

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Inno Gatin

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Većeslav Čorić, dipl. ing.

Student:

Inno Gatin

Zagreb, 2014.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se profesoru Čoriću na uloženom trudu i na prenesenom znanju iz područja pomorstvenosti bez čega izrada ovog rada ne bi bila moguća. Posebno se zahvaljujem profesoru Jasaku na stečenom znanju korištenja programa OpenFOAM i na pružanju sredstava za rad. Također se zahvaljujem Vuki Vukčeviću na velikodušno pruženoj pomoći tokom izrade rada.

Inno Gatin



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za završne i diplomске ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Inno Gatin**

Mat. br.: 0035185258

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **NUMERIČKA SIMULACIJA OPTEREĆENJA STATIČKE STRUKTURE UDAROM VALOVA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **NUMERICAL SIMULATION OF WAVE LOADING ON STATIC OFFSHORE STRUCTURES**

Opis zadatka:

Za pouzdano dimenzioniranje statičkih pomorskih konstrukcija potrebno je uzeti u obzir opterećenje koje stvaraju morske struje, plima i oseka, te posebno udari valova. Određivanje stabilnosti konstrukcije pod ovim tipom opterećenja zahtjeva detaljno poznavanje maksimalnih sila i momenata koji se mogu pojaviti tijekom eksploatacije pomorskog objekta.

Dok je kod valnog opterećenja uslijed pravilnih, harmonijskih valova moguće koristiti klasičnu linearnu valnu teoriju, proračun sila u ekstremnim slučajevima je znatno više zahtjevan: kao primjer navodimo udar stogodišnjeg ili tisućugodišnjeg vala na strukturu. U završnom zadatku koristit će se metode simulacije viskoznog strujanja sa slobodnom površinom računalne mehanike fluida.

U završnom radu je potrebno:

- napraviti pregled literature eksperimentalnih ispitivanja valnog opterećenja statičkih pomorskih konstrukcija, gdje karakterizacija valnog polja i mjereni rezultati opterećenja zadovoljavaju uvjete postavljene numeričkim modelom;
- pripremiti proračunsku mrežu, početne i rubne uvjete potrebne za numeričku simulaciju;
- izvršiti numeričku simulaciju viskoznog strujanja sa slobodnom površinom koristeći softverski paket OpenFOAM;
- usporediti rezultate numeričkog proračuna sa rezultatima mjerenja. Izvesti studiju procjene točnosti rezultata promjenom rezolucije mreže i vremenskog koraka;
- na temelju ponuđene literature ispitati metodu simulacije udara ekstremnog vala (engl. freak wave) na strukturu. Od posebnog interesa su metode inicijalizacije ekstremnog vala poznatih karakteristika u numeričkoj simulaciji;
- izvršiti simulaciju udara ekstremnog vala u strukturu, koristeći postojeću proračunsku mrežu.

Rezultate je potrebno prikazati u grafičkom obliku.

Zadatak zadan:

11. studenog 2013.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Većeslav Čorić

Rok predaje rada:

1. rok: 21. veljače 2014.

2. rok: 12. rujna 2014.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 3., 4. i 5. ožujka 2014.

2. rok: 22., 23. i 24. rujna 2014.

Predsjednica Povjerenstva:

Nastia Degiuli
Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD	1
2. MATEMATIČKI MODEL	3
2.1. Navier – Stokesove jednačbe.....	3
2.1.1 Rubni uvjeti Navier –Stokesovih jednačbi.....	4
2.2. Metode praćenja slobodne površine	5
2.2.1. „Volume of Fluid“ metoda modeliranja slobodne površine	6
2.2.2. Modeliranje slobodne površine pomoću „Level Set“ metode	8
3. ANALIZA OPTEREĆENJA USPRAVNOG KVADRATNOG STUPA USLIJED NAILASKA MASE VODE	10
3.1. Eksperimentalno ispitivanje	10
3.2. CFD proračun opterećenja uspravnog kvadratnog stupa koristeći programski paket OpenFOAM.....	11
3.2.1. Geometrija domene simulacije i rubni uvjeti	11
3.2.2. Rezultati simulacije.....	12
4. MODELIRANJE VALOVA POMOĆU RELAKSACIJSKIH ZONA	18
5. ANALIZA VALNIH OPTEREĆENJA VERTIKALNOG CILINDRA	20
5.1. Eksperimentalno ispitivanje	20
5.2. CFD proračun opterećenja vertikalnog cilindra uslijed nailaska valova koristeći programski paket OpenFOAM	20
5.2.1. Geometrija domene simulacije i postavke proračuna	20
5.2.2. Rezultati CFD proračuna	23
6. GENERIRANJE EKSTREMNOG VALA	25
6.1. Modeliranje ekstremnog vala pomoću spektra valova	25
6.1.1. Izračun faznih pomaka valnih komponent i profila elevacije slobodne površine	27
6.2. Simulacija ekstremnog vala u programu OpenFOAM	28
7. ZAKLJUČAK	32

POPIS SLIKA

Slika 1.	Geometrija eksperimentalnog ispitivanja [8].	11
Slika 2.	Izgled domene simulacije i slobodne površine u početnom trenutku.	12
Slika 3.	Polje vrijednosti funkcije α u simulaciji u kojoj se koristila VOF metoda.	13
Slika 4.	Polje vrijednosti funkcije α u simulaciji u kojoj se koristila „Level Set“ metoda.	14
Slika 5.	Prikaz simulacije u trenutku prvog udara vode o stup.	14
Slika 6.	Prikaz simulacije u trenucima refleksije od stražnjeg zida domene.	15
Slika 7.	Prikaz simulacije u trenutku udara povratnog vala.	15
Slika 8.	Usporedba sile opterećenja u smjeru nailaska mase vode.	16
Slika 9.	Usporedba brzine tekućine u točki ispred stupa.	17
Slika 10.	Prikaz nametnutih brzina iz valne teorije u ulaznoj relaksacijskoj zoni.	19
Slika 11.	Vrijednosti funkcije f_R .	19
Slika 12.	Stvarne brzine u domeni, m/s (valovi napreduju u smjeru osi x).	19
Slika 13.	Prikaz simulacije u početnom trenutku za val broj 3	21
Slika 14.	Polje brzine harmonijskog vala.	22
Slika 15.	Prikaz mreže konačnih volumena u blizini cilindra.	23
Slika 16.	Signal sile u smjeru uzdužne osi za val br. 3 (tablica 1).	23
Slika 17.	Dijagram funkcije spektralne gustoće valova.	27
Slika 18.	Teoretski izgled ekstremnog vala dobivenog fokusiranjem valova.	28
Slika 19.	Prikaz profila vala u simulaciji.	29
Slika 20.	Prikaz simulacije u trenutku prije udara vala u cilindrični stup.	30
Slika 21.	Prikaz polja brzine u ekstremnom valu.	30
Slika 22.	Prikaz simulacije u trenutku udara ekstremnog vala u cilindrični stup	31
Slika 23.	Ovisnost oplakane površine cilindra o vremenu uslied nailaska	31

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Karakteristike nailaznih valova.....	21
Tablica 2.	Usporedba rezultata CFD proračuna sa eksperimentalnim podacima.....	24

POPIS OZNAKA

Latinska slova

Oznaka	Jedinica	Opis
Co	-	Courantov broj
Err	-	relativna greška uzdužne sile opterećenja
f	Hz	valna frekvencija
f_i	m/s^2	masena sila
f_R	-	težinska funkcija za reakciju
F_x	N	uzdužna sila opterećenja
g	m/s^2	gravitacijska konstanta
h	m	valna visina
$H_{1/3}$	m	značajna valna visina
k	rad/m	valni broj
N	-	indeks vala
P	m^2/s^2	dinamički tlak
p	Pa	tlak
$S_{\eta\eta}$	m^2s/rad	funkcija spektra energije valova
t	s	vrijeme
T	s	valni period
T_l	s	dominantni valni period
u_i	m/s	vektor brzine
V	m^3	obujam kontrolnog volumena
x_i	m	vektor položaja u koordinatnom sustavu

Grčka slova

Oznaka	Jedinica	Opis
α	-	indikatorska funkcija VOF metode
ε	-	fazni pomak harmonijskog vala
η	m	funkcija elevacije vala
η_a	m	amplituda vala
λ	m	valna duljina
μ	Pas	dinamička viskoznost fluida
ν	m^2/s	kinematička viskoznost fluida
ρ	kg/m^3	gustoća fluida
σ_{ij}	Pa	tenzor naprezanja
τ	m	pseudo vrijeme
ω	rad/s	kružna frekvencija vala

SAŽETAK

Inno Gatin

NUMERIČKA SIMULACIJA OPTEREĆENJA NEPOMIČNE KONSTRUKCIJE UDAROM VALA

Primjenom računalne dinamike fluida (eng. „*Computational Fluid Dynamics*“, skraćeno CFD) izvršena je analiza opterećenja nepomičnih konstrukcija izloženih dvofaznom strujanju sa slobodnom površinom i površinskim valovima. Rezultati su uspoređeni sa eksperimentalnim rezultatima radi potvrde točnosti softverskog alata OpenFOAM. U radu se koriste metode simulacije viskoznog strujanja sa slobodnom površinom. Kroz rad se nastoji prikazati mogućnost primjene računalne dinamike fluida na tipične probleme proračuna opterećenja pomorskih objekata. Najprije su prikazani matematički modeli na temelju kojih se zasniva numerički proračun. Taj dio rada obuhvaća Navier – Stokesove jednačbe te njihove rubne uvjete, kao i formulaciju metode „*Volume of Fluid*“ (skraćeno VOF) i „*Level Set*“ koje se koriste za definiciju slobodne površine kao granice dvaju medija. Napravljen je proračun opterećenja nepomičnog stupa kvadratnog poprečnog presjeka prilikom nailaska udarnog vodenog vala (eng. „*3D dam break*“), te su dobiveni rezultati uspoređeni sa odgovarajućim podacima dobivenim eksperimentalnim ispitivanjima. Za ovu simulaciju je korišten Courantov broj jednak 0.5. U drugom dijelu je opisano modeliranje valova u CFD-u pomoću relaksacijskih zona. Proveden je i proračun opterećenja cilindričnog tijela vertikalno uronjenog u bazen pod djelovanjem harmonijskih progresivnih valova za četiri slučaja te su rezultati također uspoređeni sa eksperimentalnim podacima. Korišteni su Courantovi brojevi od 1.5 do 6, dok se za transport indikatorske funkcije α koristio Courantov broj od 0.75 do 3. Veličina ćelija se linearno smanjuje od rubova domene prema cilindru. Opisano je generiranje ekstremnih valova pomoću fokusiranja valova (eng. „*Wave focusing*“). Napravljena je simulacija ekstremnog vala na istoj geometriji mreže kao u prethodnom poglavlju te su prikazani rezultati. Softverski alat koji je korišten za CFD proračune je programski paket OpenFOAM.

Ključne riječi: računalna dinamika fluida, volume of fluid, level set, valna opterećenja nepomične konstrukcije, ekstremni val

SUMMARY

Inno Gatin

NUMERICAL SIMULATION OF WAVE LOADING ON STATIC OFFSHORE STRUCTURES

Analysis of wave loads on static offshore structure is carried out using Computational Fluid Dynamics (CFD). Results are compared with corresponding experimental results in order to validate software tools used in simulations. Simulations are calculated using viscous two phase free surface flow model using Volume of Fluid (VOF) and Level Set method for interface capturing. Intention of this work is to show the possibilities of application of CFD on problems of assessing loads on offshore structures. Firstly, governing mathematical model is shown on which the numerical calculations are based. This includes Navier–Stokes equations and formulation of VOF and Level Set methods. Forces on square column are calculated in 3D dam break case and results are compared with experimental data. Courant number 0.5 is used for this simulation. Then, method for wave modeling in CFD using relaxation zones is described. Analysis of loads on vertical cylinder immersed in water with incoming waves is conducted. Four simulations were done with different wave frequencies. Results are verified by comparison with experimental data. Linear grading is used to refine mesh in vicinity of the cylinder. Courant numbers between 1.5 and 6 and for transport of indicator function α Courant numbers from 0.75 and 3 are used. Initialization of freak wave based on wave focusing method is presented. Simulation of freak wave in CFD is shown on the geometry used in previous chapter. All numerical simulations are performed using OpenFOAM.

Key words: computational fluid dynamics, volume of fluid, level set, wave loading on static offshore structures, freak wave

1. UVOD

Projektiranje pomorskih objekata zahtijeva poznavanje opterećenja do kojih može doći tokom eksploatacije. Ovisno o pouzdanosti podataka o opterećenjima, margina sigurnosti pomorskog objekta biti će veća ili manja. Svjedoci smo da se ta margina razvojem novih numeričkih metoda sve više smanjuje. Manja margina sigurnosti znači ekonomičniji projekt, međutim pritom se ne smiju ugroziti životi posade i materijalna dobra. Kako bi predviđanje opterećenja bilo što točnije, industrija se sve više oslanja na rezultate proračuna CFD-a kao alternativni eksperimentalnim ispitivanjima. Računalne simulacije ponašanja fluida imaju brojne prednosti nad eksperimentalnim metodama. Ponajprije je to ekonomičnost u usporedbi sa eksperimentalnim metodama. Iako je hardverska i softverska oprema za ozbiljnije mogućnosti proračuna CFD-a znatna investicija, cijena joj se uvelike razlikuje od cijene kvalitetnog pogona za provođenje eksperimenata. Osim toga, potreban ljudski resurs je manji. Još jedna od prednosti je mogućnost dobivanja gotovo neograničenog obujma i rezolucije rezultata za pojedinu simulaciju. Prilikom eksperimenata, ovisno o željenoj razini detalja rezultata treba osigurati opremu i ljudstvo potrebno za prikupljanje rezultata, čija cijena raste sa porastom broja ispitivanih veličina i njihove rezolucije. U nekim slučajevima eksperimente nije moguće niti provesti iz raznih razloga. Unatoč svim prednostima, prilikom analize rezultata CFD proračuna treba imati na umu njegova ograničenja koja su određena matematičkim i fizikalnim osnovama na kojima se temelji kôd programa. Program OpenFOAM za proračun koristi metodu kontrolnih volumena (eng. „*Finite Volume Method*“) koja se temelji na Eulerovom pristupu opisa strujanja fluida.

Ostatak ovog rada organiziran je na slijedeći način. U dugom poglavlju opisan je matematički model koji opisuje strujanje nestlačivog izotermnog viskoznog fluida sa slobodnom površinom. U proračunima nije korišten model turbulencije jer se pokazalo da je utjecaj turbulencije na ovakve probleme zanemariv, te zato što postojeći modeli turbulencije nisu prilagođeni za modele dvofaznog strujanja. Prikazani su matematički modeli i metode kojima se definira slobodna površina kao nagla promjena svojstava fluida unutar domene. To su „*Volume of Fluid*“ (VOF) metoda i „*Level Set*“ metoda. U trećem poglavlju opisana je analiza opterećenja nepomičnog stupa kvadratnog poprečnog presjeka uslijed nailaska udarnog vodenog vala. Napravljen je CFD proračun te su rezultati analizirani i uspoređeni sa odgovarajućim eksperimentalnim rezultatima. Četvrto poglavlje opisuje način inicijalizacije površinskih valova u OpenFOAM-u koji su se koristili za simulaciju opisanu u poglavlju pet. U poglavlju pet prikazana je analiza CFD proračuna opterećenja uspravnog cilindričnog tijela

usijed nailaska harmonijskih progresivnih valova definiranih linearnom valnom teorijom. Poglavlje šest daje metodu generiranja ekstremnog vala (eng .*“Freak wave”*) u CFD simulaciji. Ovakve simulacije su od velike važnosti zbog analize opterećenja pučinskih nepomičnih objekata uslijed nailaska valova. Prije manje od dvadeset godina ekstremni valovi nisu bili priznati od strane znanstvenika, dok se danas smatra da su puno češći nego što se prije mislilo. Dan je prikaz rezultata simulacije ekstremnog vala u domeni iste geometrije kao u slučaju poglavlja pet. Konačno je dan zaključak provedenih analiza.

2. MATEMATIČKI MODEL

Strujanje viskoznog fluida opisano je Navier–Stokesovim parcijalnim diferencijalnim jednačbama [1] koje predstavljaju zakon očuvanja količine gibanja, te jednačbom kontinuiteta koja predstavlja zakon očuvanja mase. Ovdje su ukratko objašnjene spomenute jednačbe te su objašnjeni rubni uvjeti Navier – Stokesovih jednačbi. Dan je i kratki prikaz formulacije modela indikatorske funkcije korištene za VOF [2] i „*Level Set*“ [3] metodu.

2.1. Navier – Stokesove jednačbe

Zakon očuvanja mase primjenjen na infinitezimalni element volumena fluida daje jednačbu kontinuiteta, dok se na temelju zakona za očuvanje količine gibanja dobivaju Navier – Stokesove jednačbe. Za općeniti homogeni izotermni fluid navedene jednačbe glase:

Jednačba kontinuiteta:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho}{\partial x_j} + \rho \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0. \quad (1)$$

Jednačba očuvanja količine gibanja:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \rho f_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2)$$

gdje je σ_{ij} tenzor naprezanja koji sadrži naprezanja uslijed tlaka i viskozna naprezanja, koja sadrže normalnu i tangencijalnu komponentu. Kako se ovaj problem odnosi na približno nestlačivi fluid, normalna komponenta viskoznog naprezanja se zanemaruje jer ovisi o divergenciji brzine. Tako ostaju naprezanja uslijed tlaka i tangencijalna viskozna naprezanja ovisna o promjeni brzine kutne deformacije. Ovdje pretpostavljamo da se radi o Newtonskom fluidu, kod kojega su viskozna naprezanja u linearnom odnosu sa brzinom promjene kutne deformacije preko koeficijenta dinamičke molekularne viskoznosti μ . Veličina f_i predstavlja masenu silu, u ovom slučaju gravitacijsku silu.

Uzimajući u obzir nabrojene pretpostavke, te pretpostavku da je koeficijent dinamičke viskoznosti konstantan, dobivamo sljedeće izraze iz jednačbi (1) i (2):

Jednačba kontinuiteta za nestlačivo strujanje:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (3)$$

Navier – Stokesove jednačbe za nestlačivo strujanje:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \rho f_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right). \quad (4)$$

Izraz (4) podjeljen sa gustoćom daje pogodniji oblik za daljnje korištenje:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right), \quad (5)$$

gdje su:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \text{ kinematička viskoznost,} \quad (6)$$

$$p = \frac{P}{\rho}, \text{ dinamički tlak.} \quad (7)$$

Detaljan izvod gornjih jednačbi može se naći u [1].

Kako promjena količine gibanja odgovara sili, može se reći da članovi lijeve strane jednačbe (5) predstavljaju inercijske sile, drugi član desne strane silu tlaka i zadnji član desne strane viskozne sile. Dakle zadnji član predstavlja disipaciju energije te se zato naziva difuznim. Vidljivo je da je jednačba (5) nelinearna parcijalna diferencijalna jednačba, te ju je za realne trodimenzionalne slučajeve analitički nemoguće riješiti. Nelinearnost potječe od drugog člana lijeve strane jednačbe, tzv. konvekcijskog člana. Iz tog razloga se rezultati nastoje dobiti numeričkim metodama, gdje se gornji sustav jednačbi linearizira te rješava iterativno.

2.1.1 Rubni uvjeti Navier –Stokesovih jednačbi

Kako bi sustav Navier – Stokesovih jednačbi bio rješiv potrebno je zadati početne i rubne uvjete. Početni uvjeti zadaju se kao vektorska i skalarna polja u početnom trenutku proračuna. Rubni uvjeti se moraju odrediti na graničnim plohama. Rubni uvjeti se mogu promatrati kao matematički ili fizikalni [4].

Matematički rubni uvjeti su općeniti rubni uvjeti neke veličine na rubu domene. Dva su osnovna tipa matematičkih rubnih uvjeta:

- I) Dirichletov rubni uvjet propisuje vrijednost veličine na rubu domene,
- II) Generalizirani von Neumannov rubni uvjet propisuje gradijent veličine u normalnom smjeru na površinu granice.

Fizikalni rubni uvjeti uvjetovani su prirodom promatranog procesa. U njih spada: rubni uvjet zida, simetralne ravnine, presjeka ulaza (eng. „*inlet*“) i izlaza (eng. „*outlet*“) fluida iz domene, atmosferski rubni uvjet i drugi. Svaki fizikalni rubni uvjet sastavljen je od niza matematičkih rubnih uvjeta za pojedine veličine koje se računaju.

- Rubni uvjet zida određuje brzinu fluida uz zid kao jednaku brzini zida, time se postavlja uvjet ljepljenja viskoznog fluida. Gradijent tlaka u smjeru normale na zid je jednak nuli što slijedi iz uvjeta nepromočivosti zida.
- Na presjeku ulaza određena je brzina dostrujavanja fluida u domenu dok se za tlak koristi von Neumannov rubni uvjet (uvjet nultog gradijenta).
- Presjek izlaza svojim rubnim uvjetima mora zadovoljavati globalno očuvanje mase u domeni proračuna. To se postiže na jedan od dva načina. Prvi način je da se brzina određuje iz brzina prvih susjednih kontrolnih volumena uz granicu, gdje se brzine umanjuju ili uvećavaju sa nekim faktorom da bi se postiglo očuvanje mase. Ovakav rubni uvjet može uzrokovati nestabilnosti ukoliko se pojavi protok natrag u domenu kroz izlaznu granicu. Za tlak se također određuje nulti gradijent. Drugi način je da se tlak zada kao nepromijenjiv, dok se za brzinu postavi uvjet nultog gradijenta u smjeru normale na izlaznu granicu. Ovakav uvjet osigurava konzervativnost mase jer se nakon diskretizacije jednadžbi (3) i (5) tlak rješava pomoću jednadžbe kontinuiteta.
- Na ravnini simetrije se postavlja uvjet da se komponente gradijenta normalne na ravninu simetrije postavljaju na nultu vrijednost, dok se tangencijalne komponente projiciraju na ravninu sa prvog reda konačnih volumena uz granicu. Ravnina simetrije omogućuje znatne uštede vremena proračuna jer se pomoću nje domena može smanjiti dva puta.
- Atmosferski rubni uvjet omogućuje prolaz fluida kroz plohu u oba smjera. Ako je brzina takva da fluid izlazi iz domene tada se postavlja rubni uvjet nultog gradijenta. Ako je brzina ulazna, tada se za rubni uvjet uzima brzina jednaka brzini u središtu kontrolnog volumena koji je uz graničnu plohu. Na tlak se postavlja uvjet propisane vrijednosti.

2.2. Metode praćenja slobodne površine

Slobodna površina predstavlja oštro prijelazno područje između dva fluida veoma različitih svojstava. U problemima iz brodogradnje redovito se radi o slatkoj ili morskoj vodi i zraku.

Osim podmornica, svi pomorski objekti su površinski, odnosno nalaze se upravo na međi dva fluida. Kako bi se opisale pojave koje se događaju na slobodnoj površini, te tako dobili rezultati opterećenja površinskih pomorskih objekata, potrebno je matematički definirati slobodnu površinu. Ovdje su opisana dva načina opisivanja slobodne površine koja su korištena tokom provođenja proračuna za ovaj rad. Metode su poznate kao „*Volume of Fluid*“ [2] i „*Level Set*“ [3] metoda.

2.2.1. „*Volume of Fluid*“ metoda modeliranja slobodne površine

Ova se metoda zaniva na udjelu volumena pojedinih faza u promatranom kontrolnom volumenu. Provođi se pomoću indikatorske funkcije α . Obzirom da funkcija α predstavlja fizikalnu veličinu ova metoda konzervira volumen pojedinih faza, te samim time i masu obzirom da se radi o nestlačivim medijima.

Kako bi se određenim fazama fluida pridružila odgovarajuća svojstva njihove vrijednosti dobivamo pomoću izraza:

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 , \quad (8)$$

$$\mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2 , \quad (9)$$

gdje α predstavlja indikatorsku funkciju, za koju vrijede svojstva:

$$\alpha(x_i, t) = \begin{cases} 1, & \text{za točku u fluidu 1,} \\ 0, & \text{za točku u fluidu 2.} \end{cases} \quad (10)$$

Funkcija α predstavlja skalarno polje, dakle njena vrijednost ovisi o položaju i vremenu. Vrijednosti iz (8) i (9) za gustoću i dinamičku viskoznost fluida koriste se u Navier–Stokesovim jednadžbama. Pošto je u domeni simulacije jedan kontinuum, nužno je da su sva njegova svojstva kontinuirana po cijeloj domeni, odnosno da su njihove funkcije derivabilne. Uslijed definicije (10) vidljivo je da dolazi do skokovite promjene funkcije na slobodnoj površini. Kako bi se to izbjeglo, svojstva α funkcije se modificiraju tako da ona postaje kontinuirana po cijeloj domeni:

$$\alpha(x_i, t) = \begin{cases} 1, & \text{za točku u fluidu 1,} \\ 0 < \alpha < 1, & \text{za prijelazno područje,} \\ 0, & \text{za točku u fluidu 2.} \end{cases} \quad (11)$$

Vrijednosti indikatorske funkcije unutar ćelija u kojoj se nalazi slobodna površina biti će tako između vrijednosti 0 i 1. Na ovaj način se debljina slobodne površine sa beskonačno male veličine povećala na konačnu veličinu, što je nužno zbog numeričke formulacije. Vrijednost funkcije α unutar ćelije koja sadrži slobodnu površinu jednostavno se izračuna kao:

$$\alpha = \frac{V_1}{V}, \quad (12)$$

gdje je V_1 volumen fluida 1 u ukupnom volumenu kontrolnog volumena V .

Obzirom da se slobodna površina giba skupa sa česticama od kojih je sačinjena, njezina materijalna derivacija mora ostati jednaka nuli. Drugim riječima, u Lagrangeovom opisu strujanja fluida, slobodna površina se uvijek nalazi u istim materijalnim volumenima koji prate gibanje ostalih čestica fluida [5]. U Eulerovom opisu strujanja to znači da materijalna derivacija funkcije slobodne površine mora biti jednaka nuli. Ovaj uvjet daje parcijalnu diferencijalnu jednadžbu indikatorske funkcije α :

$$\frac{D\alpha}{Dt} = \frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} = 0. \quad (13)$$

Jednadžba (13) se jednostavno može transformirati u konzervativni oblik, kojeg je lakše diskretizirati te osigurava konzervativnost mase. Koristeći pravilo o deriviranju umnoška dvaju funkcija dobije se:

$$u_i \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} = \frac{\partial(u_i \alpha)}{\partial x_i} - \alpha \frac{\partial u_i}{\partial x_i}. \quad (14)$$

Nakon primjene jednadžbe (3) na jednadžbu (14) drugi član desne strane jednadžbe (14) iščezava te dobije se izraz:

$$u_i \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} = \frac{\partial(u_i \alpha)}{\partial x_i}, \quad (15)$$

koji uvršten u (13) daje konačnu transportnu jednadžbu indikacijske funkcije α :

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial(u_i \alpha)}{\partial x_i} = 0. \quad (16)$$

Za vrijednosti skalarnog polja α zadaju se početni i rubni uvjeti. Rubni uvjeti ovise o promatranom problemu, dok početni uvjeti opisuju položaj slobodne površine u početnom

trenutku simulacije. Početni položaj slobodne površine može na primjer biti ravna ploha (mirna voda) ili valovita površina, ovisno o razmatranom problemu.

2.2.2. Modeliranje slobodne površine pomoću „Level Set“ metode

Ova se metoda za sada manje koristi od VOF metode. Glavni razlog tomu je što u izvornoj formulaciji nije konzervativna. Metoda se zasniva na funkciji udaljenosti propisanog predznaka (eng. „*signed distance function*“). Vrijednost funkcije ovisi o najmanjoj udaljenosti točke od slobodne površine, dok predznak vrijednosti ovisi o fazi u kojoj se točka nalazi. Primjerice, ako se točka nalazi u vodi predznak vrijednosti udaljenosti biti će pozitivan, dok za točku u zraku vrijedi obrnuto. Prednost nad VOF metodom je kontinuiranost vrijednosti funkcije po cijeloj domeni, što osigurava veću stabilnost modela.

Kao što je prije spomenuto, vrijednost funkcije udaljenosti ϕ ovisi o udaljenosti točke od slobodne površine, dok joj predznak ovisi o fazi u kojoj se točka nalazi. Stoga su vrijednosti funkcije ϕ određene kao:

$$\phi(t, x_i) = \begin{cases} -d, & \text{za } x_i \in \Omega_1 \\ 0, & \text{za } x_i \in \Gamma, \\ +d, & \text{za } x_i \in \Omega_2 \end{cases} \quad (17)$$

gdje je Ω_1 skup točaka koji čini prvu fazu, Ω_2 skup točaka druge faze, dok je Γ skup točaka od kojih je sastavljena slobodna površina. Udaljenost d je najmanja udaljenost točke x_i do slobodne površine. Za transport funkcije udaljenosti ϕ koristi se ista jednadžba kao i za α funkciju u VOF metodi [3]. Do jednadžbe (18) se dođe na isti način kao i do jednadžbe (16) iz jednadžbe (13):

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial (u_i \phi)}{\partial x_i} = 0. \quad (18)$$

Da bi funkcija ϕ bila funkcija udaljenosti ona mora biti linearna funkcija, te joj iznos vektora gradijenta mora biti jednak jedinici. Ovo svojstvo tokom transporta često nije ispunjeno, međutim da bi se precizno i stabilno pratila slobodna površina, gradijent funkcije ϕ mora biti jednak jedinici u blizini slobodne površine. Da bi se to osiguralo uvodi se korekcija skalarne funkcije ϕ koja ovisi o odstupanju gradijenta funkcije od jedinice [6]. To se provodi pomoću sljedeće relacije:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} + S(\phi) \left(\left| \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right| - 1 \right) = 0, \quad (19)$$

gdje je τ pseudo vrijeme kojim se korigira funkcija udaljenosti. Naime, nije nužno da daleko od slobodne površine funkcija ϕ bude funkcija udaljenosti, tj. da joj je gradijent jednak jedinici, sve dok je odgovarajućeg predznaka. Međutim, na nekoj udaljenosti τ od slobodne površine je potrebno imati točnu funkciju udaljenosti. Iznos τ se obično uzima dva do tri konačna volumena u smjeru normale na slobodnu površinu. Drugi član sa lijeve strane jednadžbe (19) čini razliku gradijenta funkcije ϕ i jedinice, koja bi u idealnom slučaju trebala biti jednaka nuli. Ukoliko nije jednaka nuli prvi član jednadžbe se koristi za iterativnu korekciju funkcije ϕ . Uslijed korekcije funkcije udaljenosti pomoću (19) može doći do pomicanja slobodne površine uslijed toga što jednadžba (19) vodi računa samo o iznosu gradijenta funkcije ϕ , ali ne i njezinoj vrijednosti (za vrijednost $\phi = 0$ definirana je slobodna površina). Kako bi se spriječilo neželjeno pomicanje slobodne površine uvodi se dodatna korekcija u jednadžbu (19) o čemu se detaljnije može pronaći u [6].

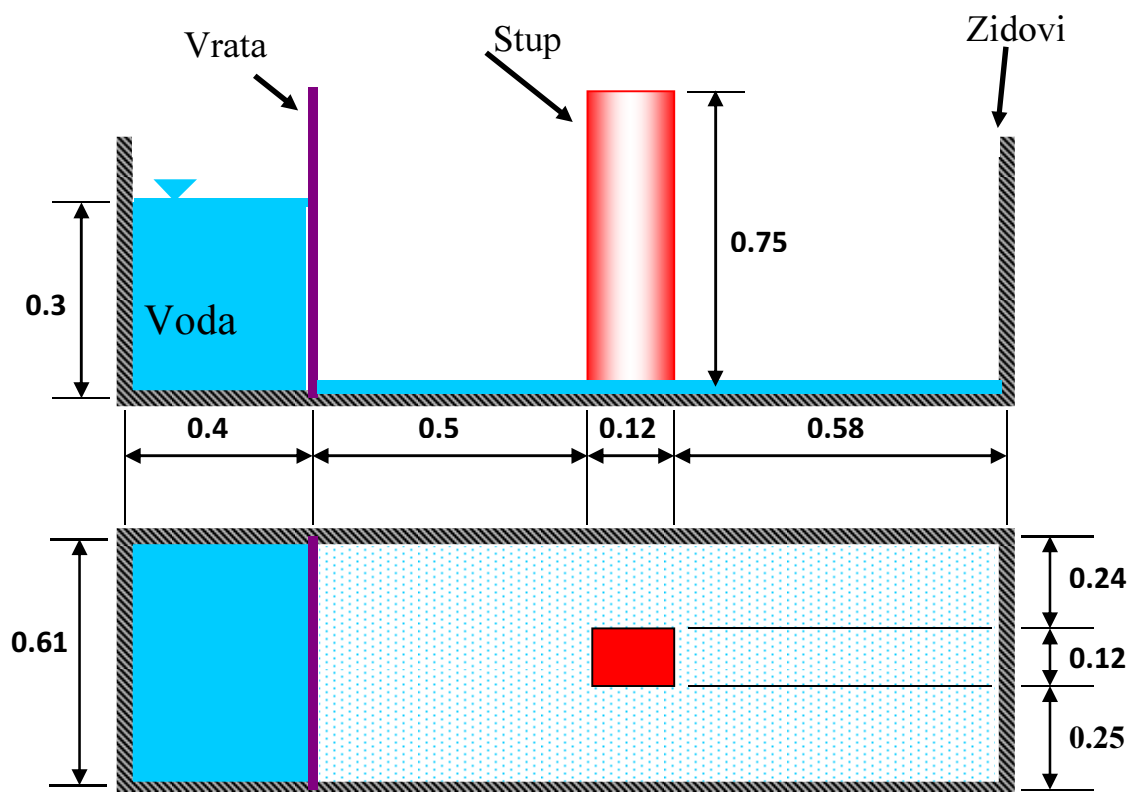
Obzirom da funkcija ϕ ne predstavlja fizikalnu veličinu koju je potrebno konzervirati, jednadžba (18) u općem slučaju ne osigurava konzervaciju mase odnosno udijela volumena pojedinih faza (za nestlačiva strujanja). Zbog toga je za potrebe proračuna kod kojih se koristila „*Level Set*“ metoda uvedena korekcija volumena koja osigurava konstantan volumen pojedinih faza. Iznos volumena koji se izgubi/poveća između dva vremenska koraka proračuna dodaje se na slobodnu površinu jer upravo tamo dolazi do gubitka/povećanja volumena. Na temelju poznate pozicije slobodne površine i iznosa izgubljenog/povećanog volumena, mijenja se funkcija ϕ sve dok promjena volumena nije prihvatljivo mala. Promjena funkcije ϕ u pojedinom konačnom volumenu se skalira u ovisnosti o brzini unutar tog volumena, jer se ustanovilo da do većih promjena u iznosu volumena dolazi tamo gdje je veća brzina [7].

3. ANALIZA OPTEREĆENJA USPRAVNOG KVADRATNOG STUPA USLIJED NAILASKA MASE VODE

Slučaj nailaska mase vode na nepomičnu konstrukciju vrlo je tranzijentna i nelinearna pojava. Dolazi do loma slobodne površine na valu koji nastaje uslijed slobodnog gibanja vode pod utjecajem gravitacije (eng. „*wave breaking*“). Potencijalne teorije nisu u mogućnosti dati uvid u zbivanja tokom ovakve pojave. Iz tog je razloga napravljena validacija programskog paketa OpenFOAM na slučaju nailaska mase vode na nepomični stup kvadratnog presjeka. Ovakvi problemi su od interesa prilikom analize opterećenja priobalnih konstrukcija uslijed nailaska velikog vala u plitkoj vodi, prilikom čega dolazi do loma vala što uzrokuje visoka opterećenja konstrukcija. Ovaj slučaj odgovara i zalijevanju palube broda (eng. „*green sea*“) uslijed čega dolazi do udarnih opterećenja na konstrukcije na palubi kao što su praznice grotla i palubne kućice, te na razne uređaje. Provedena simulacija temeljena je na eksperimentu. Geometrija domene simulacije izrađena je tako da u potpunosti odgovara postavkama eksperimentalnog ispitivanja.

3.1. Eksperimentalno ispitivanje

Eksperiment na temelju kojeg je provedena simulacija može se pronaći u [8]. Tamo su dani podatci o silama na stup tokom eksperimenta, te su dane brzine fluida u točki neposredno ispred stupa. Geometrija eksperimenta je prikazana na Slici 1. Sve dimenzije na slici 1. su u metrima. Bazen u kojemu se izvodio eksperiment sa svih je strana okružen zidovima. U početnom trenutku vrata (na Slici 1. eng. „*gate*“) održavaju razinu vode u dijelu domene na razini od 30 cm u odnosu na dno bazena. Stup kvadratnog poprečnog presjeka postavljen je otprilike na sredinu širine domene, na udaljenosti od 50 cm od vrata. Između stupa i kraja domene ostavljeno je 58 cm prostora. Ovaj eksperiment je popularan za validaciju različitih CFD alata, osobito za SPH metode (eng. „*Smoothed-Particle Hydrodynamics*“).

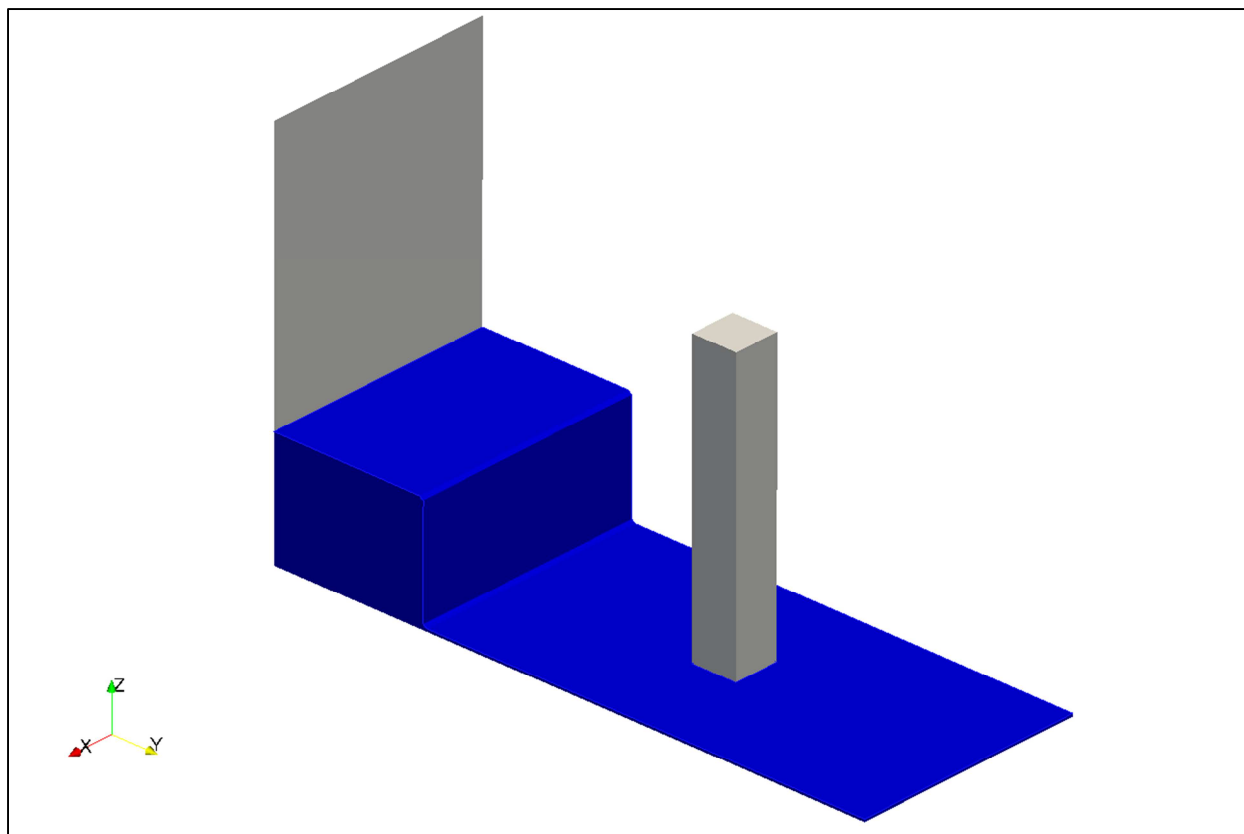


Slika 1. Geometrija eksperimentalnog ispitivanja [8].

3.2. CFD proračun opterećenja uspravnog kvadratnog stupa koristeći programski paket OpenFOAM

3.2.1. Geometrija domene simulacije i rubni uvjeti

Kao što je prije spomenuto, domena simulacije u potpunosti odgovara eksperimentu. Na Slici 2 prikazan je izgled domene simulacije u nultom trenutku. Domena je podjeljena na 1 027 430 kontrolnih volumena. Slobodna površina je u početnom trenutku postavljena tako da odgovara izgledu slobodne površine u eksperimentu. To je postignuto aplikacijom *setFields* kojom se mogu postaviti vrijedosti skalarnih i vektorskih polja unutar domene u danom trenutku. Vrata, koja su u eksperimentu u vrlo kratkom vremenu podignuta u početnom trenutku, nisu modelirana, već je slobodna površina postavljena vertikalno na mjestu vrata. Rubni uvjeti na svim graničnim površinama domene postavljeni su kao zidni rubni uvjeti. Iznimka je gornja horizontalna granica koja ima rubni uvjet atmosfere. Iako je geometrija domene simetrična u odnosu na centralnu vertikalnu uzdužnu ravninu, strujanje nipošto ne mora biti simetrično, obzirom da se radi o vrlo tranzijentnoj pojavi. Iz tog razloga se nije koristila ravnina simetrije koja bi smanjila broj ćelija i time smanjila vrijeme proračuna simulacije.

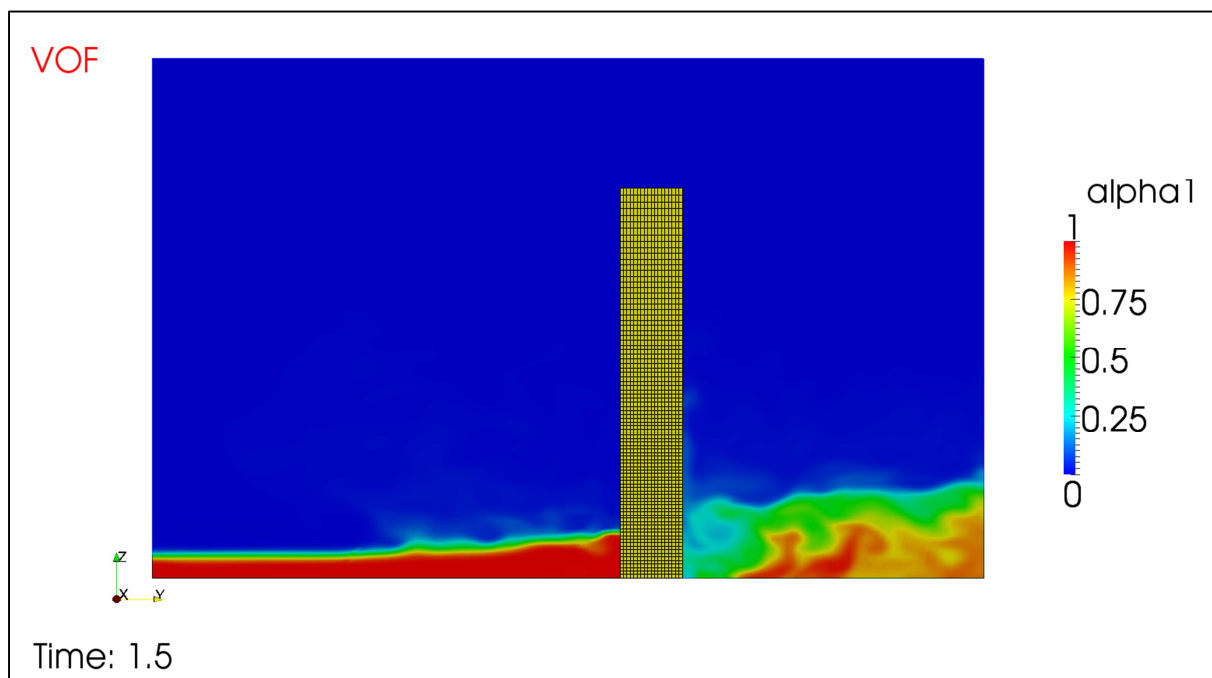


Slika 2. Izgled domene simulacije i slobodne površine u početnom trenutku.

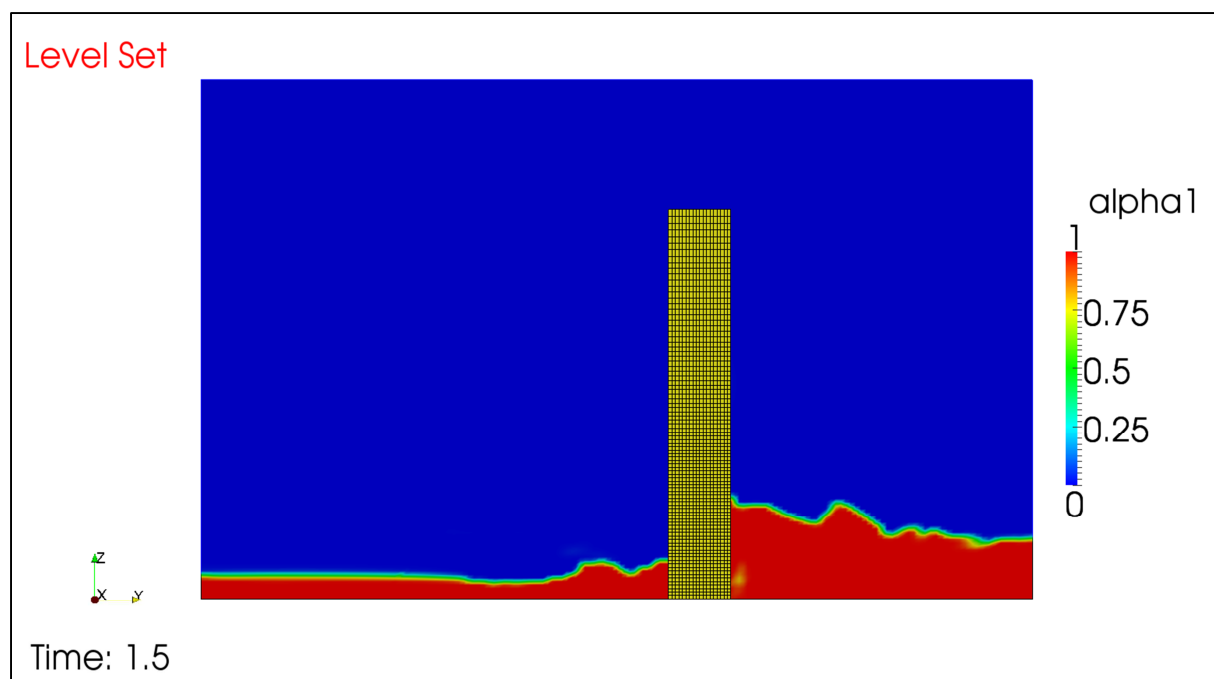
3.2.2. Rezultati simulacije

Provedena je simulacija koristeći opisane modele za praćenje slobodne površine. Najprije se koristila VOF metoda. Rezultati dobiveni korištenjem VOF metode su pokazali dobra poklapanja sa eksperimentalnim podacima za silu prvog udara nailaska vode na stup, te za brzinu fluida u točki ispred stupa. Međutim, zbivanja nakon prvog udara nisu potpuno fizikalno opisana zbog oštre geometrije koja uzrokuje tzv. numeričku difuziju slobodne površine. Uslijed numeričke difuzije slobodna površina gubi točnu definiciju u prostoru, odnosno funkcija α (poglavlje 2.2.1.) poprima vrijednosti između 0 i 1 u velikom broju kontrolnih volumena u smjeru normale na slobodnu površinu. Moglo bi se reći da je slobodna površina „razmazana“ u prostoru. Uslijed ovakvog ponašanja slobodne površine dolazi do ne zadovoljavajućih rezultata za iznos sile povratnog vala. Povratni val nastaje nakon što prvi nailazak vode doživi refleksiju o stražnji zid domene. Sila se ne podudara sa silom u eksperimentu u tom vremenskom periodu jer fluid poprima svojstva (gustoću, kinematički viskozitet) koja su između svojstava vode i zraka zbog difuzije polja α . Iz tog razloga se za provođenje simulacije, čiji su rezultati prihvaćeni kao konačni, koristila „Level Set“ metoda

za definiciju slobodne površine. Rezultati iznosa sile tokom simulacije postižu znatno bolja poklapanja sa eksperimentom, naručito u trenucima nakon prvog udara vode o stup. Na Slici 3. prikazano je polje vrijednosti funkcije α u karakterističnom trenutku nakon prvog udara vode o stup, u simulaciji u kojoj se koristila VOF metoda. Prikazana je vrijednost na centralnoj vertikalnoj uzdužnoj ravnini domene, dakle voda nailazi sa lijeve na desnu stranu slike. Za usporedbu je na Slici 4 dana vrijednost funkcije α u istom trenutku i istoj ravnini, iz simulacije u kojoj se koristila metoda „*Level Set*“.

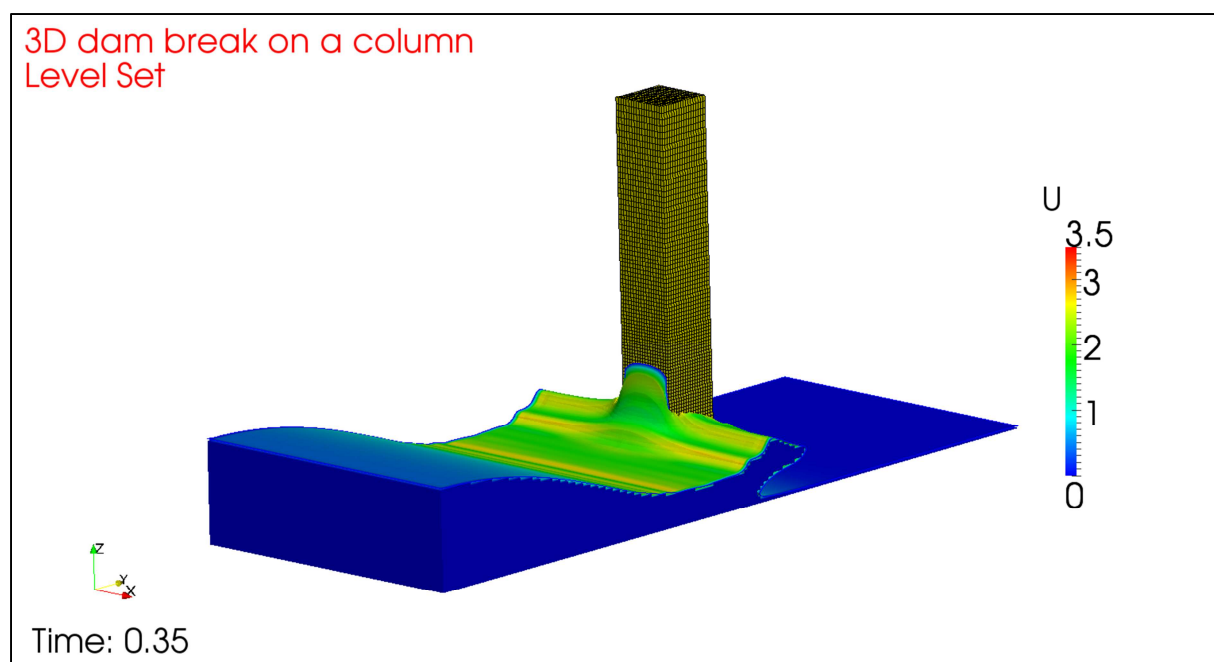


Slika 3. Polje vrijednosti funkcije α u simulaciji u kojoj se koristila VOF metoda.

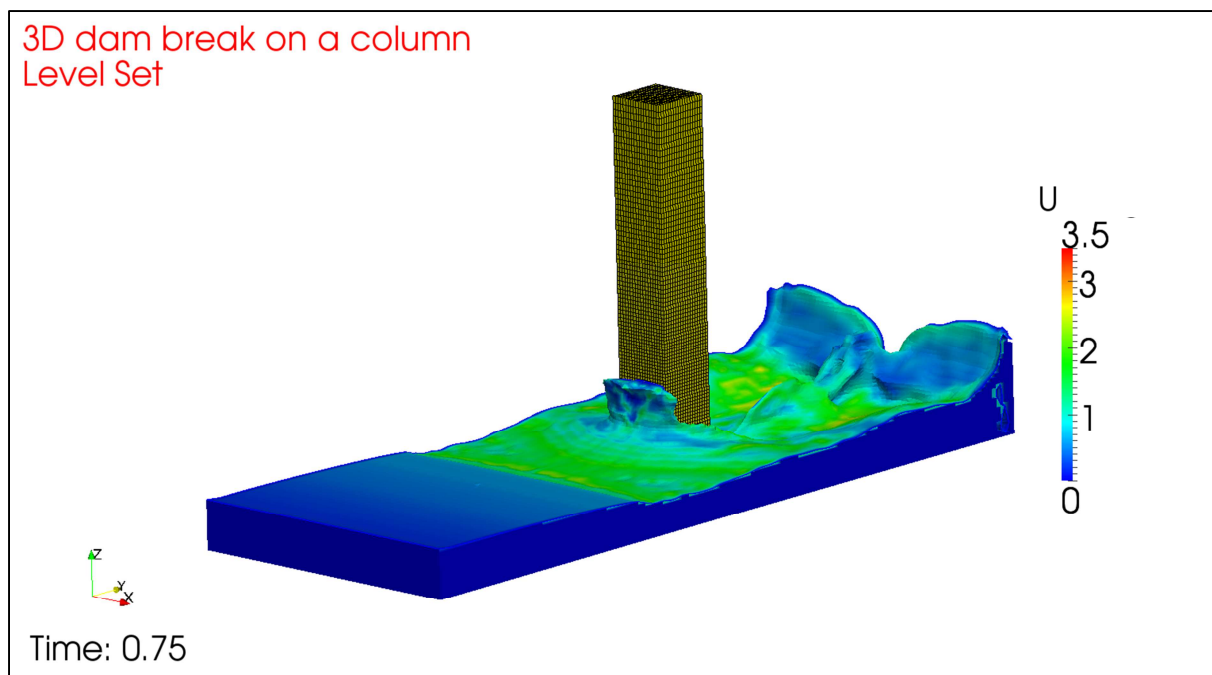


Slika 4. Polje vrijednosti funkcije α u simulaciji u kojoj se koristila „Level Set“ metoda.

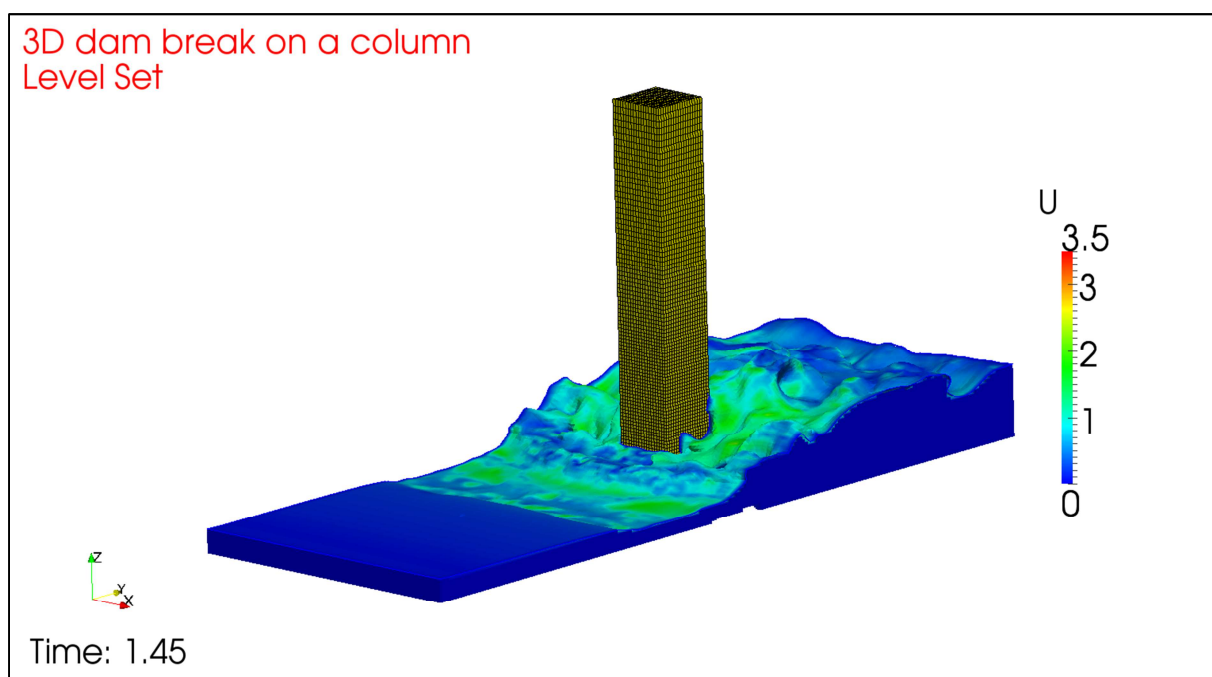
Jasno je vidljivo da debljina slobodne površine na Slici 3. u području iza stupa nije fizikalna, što dovodi do neslaganja rezultata sa eksperimentom. Isto tako je vidljivo na Slici 4 da je slobodna površina ostala tanka i nakon nailaska vode na stup, te je povratni val dobro opisan.



Slika 5. Prikaz simulacije u trenutku prvog udara vode o stup.



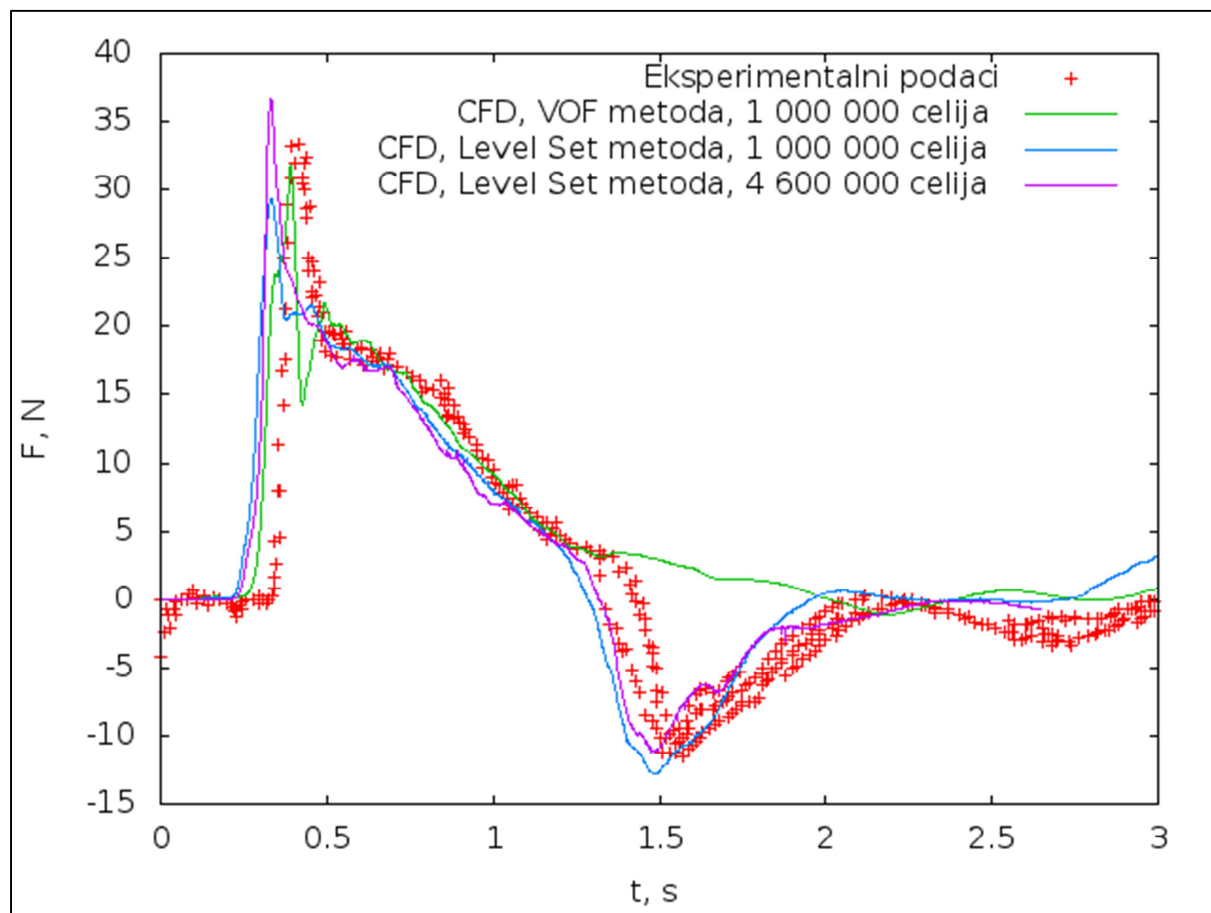
Slika 6. Prikaz simulacije u trenucima refleksije od stražnjeg zida domene.



Slika 7. Prikaz simulacije u trenutku udara povratnog vala.

Na Slikama 5, 6 i 7 su prikazani karakteristični trenuci simulacije. Slika 5 prikazuje trenutak prvog udara vode o stup. Slika 6 prikazuje simulaciju u trenucima nakon obilaska vode oko stupa te nailazak vode na stražnji zid, pri čemu se formira povratni val. Slika 7 prikazuje udar povratnog vala o stup. Slobodna površina u navedenim slikama je prikazana u skali boja ovisnoj o brzini čestica. Vizualna valjanost simulacije također je važna za validaciju softvera.

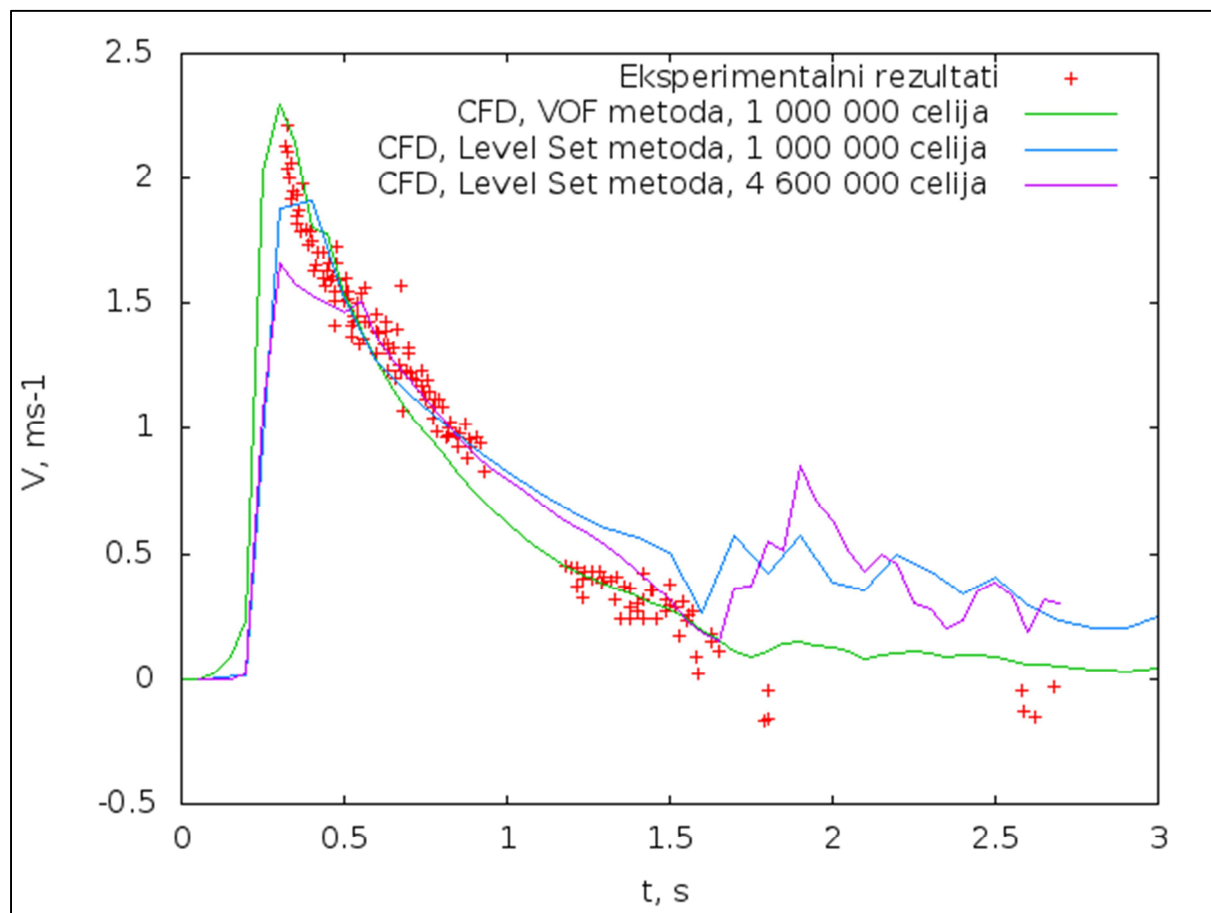
Sile opterećenja u smjeru uzdužne osi dobivene simulacijom vrlo se dobro poklapaju sa eksperimentalnim podacima. Brzine tekućine u točki ispred stupa također se vrlo dobro poklapaju. Na sljedećim dijagramima uspoređeni su podatci dobiveni eksperimentalno i podatci dobiveni simulacijom u kojoj je korištena VOF metoda te simulacijom u kojoj je korištena „Level Set“ metoda.



Slika 8. Usporedba sile opterećenja u smjeru nailaska mase vode.

Na Slici 8 iznosi sile u uzdužnom smjeru predstavljene crvenim plus znakovima su eksperimentalni podatci. Kao što je vidljivo iz dijagrama obje metode su vrlo dobro pogodile vršnu udarnu silu. Sila je malo potcijenjena, međutim treba napomenuti da je simulacija provedena na relativno malom broju ćelija. Simulacija sa većim brojem ćelija dala je nešto precijenjenu vršnu silu. Međutim vidljivo je da se signal sile finije mreže ne razlikuje znatno od signala sile dobivenog grubljom mrežom. Nagli porast sile prilikom prvog udara vode o stup dogodio se malo ranije u simulacijama u odnosu na eksperiment. Razlog tomu je taj što je u eksperimentu podizanje vrata, koja održavaju razinu vode u početnom trenutku, trajalo konačan iznos vremena. U simulaciji vrata nisu simulirana te je voda prepuštena slobodnom gibanju pod utjecajem gravitacije od početnog trenutka. U drugoj polovici simulacije može se

vidjeti na Slici 8 da simulacija u kojoj se koristila VOF metoda nije ponudila dobre iznose sile u trenucima nailaska povratnog vala. Nasuprot tome, simulacija u kojoj se koristila „*Level Set*“ metoda dala je iznose sila koje vrlo dobro odgovaraju silama dobivenim eksperimentalnim ispitivanjem u tom periodu. Opet, dakako, postoji vremenski pomak u odnosu na eksperimentalne podatke iz ranije navedenog razloga.



Slika 9. Usporedba brzine tekućine u točki ispred stupa.

Slika 9 prikazuje iznose brzina u točki koja se nalazi 24.6 cm ispred stupa u sredini širine domene, na visini od 2.6 cm od dna domene. Eksperimentalni podatci su nepotpuni, međutim može se vidjeti da je podudaranje brzine u prvom dijelu svih simulacija vrlo dobro. Simulacija u kojoj je korišten VOF pokazuje bolja slaganja sa eksperimentalnim podacima. Treba napomenuti da je „*Level Set*“ metoda tek implementirana u programski paket OpenFOAM, te se još uvijek dorađuje. Neslaganje brzine može biti uzrokovano korištenjem brzine za skaliranje dodatka volumena na slobodnoj površini (poglavlje 2.2.2.).

4. MODELIRANJE VALOVA POMOĆU RELAKSACIJSKIH ZONA

U ovom se radu za generiranje valova koristila metoda u kojoj se valne karakteristike nameću na ulazu domene s obzirom na neku valnu teoriju. Parametri dobiveni iz odgovarajuće valne teorije na ulaznoj domeni implicitno se stapaju sa Navier – Stokesovim jednažbama, što daje slobodu odabira valne teorije. U ovoj metodi se koriste relaksacijske zone [9] kako bi se ugladio prijelaz sa valnih karakteristika koje propisuje valna teorija na CFD proračun. Problem eksperimenata kao i simulacija u kojima se generiraju valovi je refleksija valova od kraja domene. Za svrhu prigušivanja valova na kraju domene koristi se izlazna relaksacijska zona.

Na ulazu u domenu postavlja se ulazna relaksacijska zona koja ima određenu duljinu (npr. jednu valnu duljinu) u kojoj će se odviti postepeni prijelaz sa teorijskih valnih karakteristika na samostalni CFD proračun. Ovo se postiže na način da se obzirom na udaljenost od ulaznog presjeka mijenja udio teorijskog rezultata i rješenja koje nudi CFD proračun. Za tu svrhu definirana je relaksacijska funkcija f_R pomoću koje se stapaju dva rješenja:

$$\phi = f_R \phi_{teorijsko} + (1 - f_R) \phi_{izračunato}, \quad (20)$$

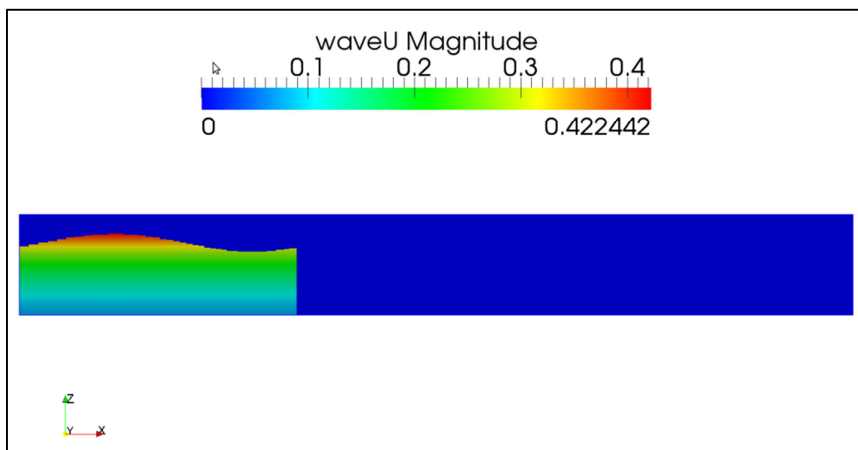
gdje je $\phi_{teorijsko}$ veličina polja (primjerice brzina) dobivena na osnovi valne teorije, dok je $\phi_{izračunato}$ veličina dobivena CFD proračunom. Na ovaj način će se računati polje brzina u_i i vrijednosti indikatorske funkcije α . Funkcija f_R je takva da joj je vrijednost na ulazu domene jednaka 1, dok joj je vrijednost na kraju ulazne relaksacijske zone jednaka 0. Drugim riječima na kraju ulazne relaksacijske zone i nadalje u domeni svojstva vala su u potpunosti prepuštena CFD proračunu. Na izlaznoj relaksacijskoj zoni vrijedi isto, uz razliku da će se vrijednosti brzina postavljati na nulu, a vrijednosti indikatorske funkcije α takve da definiraju mirnu slobodnu površinu. Funkcija f_R može biti različitih tipova, međutim u ovom radu se koristi eksponencijalna funkcija:

$$f_R(\chi_R) = 1 - \frac{e^{(\chi_R^{3.5})} - 1}{e - 1}, \quad (21)$$

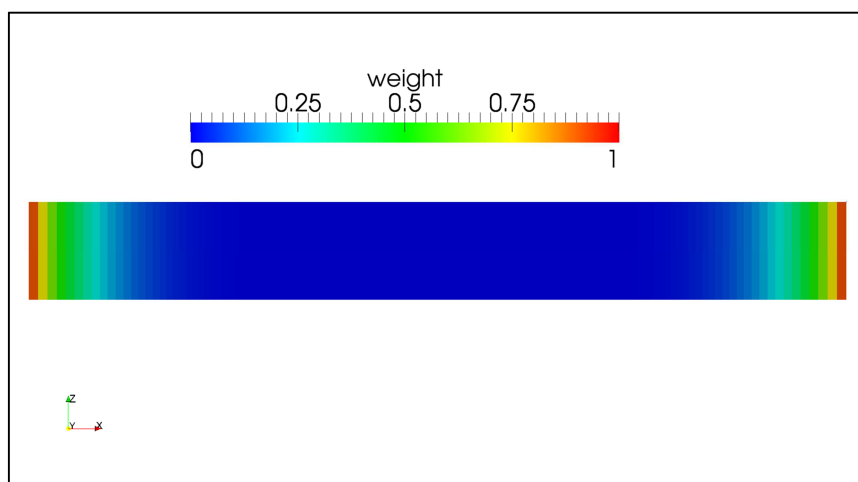
gdje je χ_R linearna funkcija čije se vrijednosti kreću od 0 do 1 na način da funkcija f_R ima potrebne vrijednosti na početku odnosno kraju relaksacijske zone.

Ulazna relaksacijska zona tokom cijelog trajanja simulacije nameće vrijednosti brzine i funkcije α po odabranoj valnoj teoriji te tako generira valove tokom simulacije. Na Slici 10 se

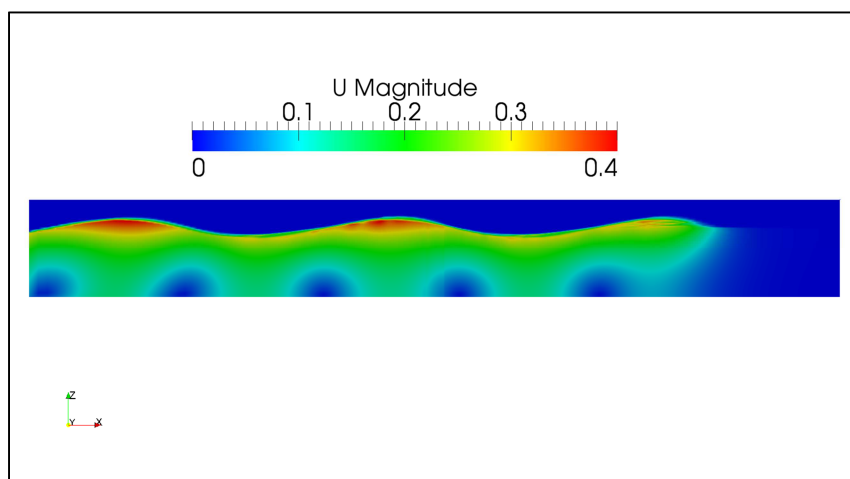
može vidjeti polje brzina koje nameće ulazna relaksacijska zona obzirom na odgovarajuću valnu teoriju. Slika 11 prikazuje vrijednost funkcije f_R za ulaznu i izlaznu relaksacijsku zonu. Slika 12 prikazuje stvarne brzine u domeni te je na njoj prepoznatljiva izlazna relaksacijska zona gdje je brzina jednaka nuli.



Slika 10. Prikaz nametnutih brzina iz valne teorije u ulaznoj relaksacijskoj zoni.



Slika 11. Vrijednosti funkcije f_R .



Slika 12. Stvarne brzine u domeni, m/s (valovi napreduju u smjeru osi x).

5. ANALIZA VALNIH OPTEREĆENJA VERTIKALNOG CILINDRA

Proračun opterećenja vertikalnih cilindričnih tijela prilikom nailaska valova od krucijalne je važnosti u industriji pomorskih objekata. Nepomične pučinske konstrukcije neprestano su izložene takvim opterećenjima. Primjeri takvih konstrukcija su nepomične naftne platforme, kao i vjetroturbine. Iako je potencijalna teorija u mogućnosti dati vrlo dobre rezultate valnih opterećenja, ne može dati uvid u sile viših redova. Sile viših redova posljedica su nelinearnih odnosa koji su zanemareni u potencijalnoj teoriji. Prirodna frekvencija elastičnog osciliranja pučinskih objekata (eng. „*ringing*“) može se naći u opasnom području rezonancije sa silama viših redova. U ovom poglavlju prikazani su rezultati CFD proračuna opterećenja vertikalnog cilindričnog stupa uslijed nailaska različitih harmonijskih valova. Simulacija je temeljena na eksperimentalnom ispitivanju provedenom u [10].

5.1. Eksperimentalno ispitivanje

Eksperimentalno ispitivanje provedeno je u bazenu dugačkom 36.5 m, širokom 2.4 m i dubokom 1.5 m [10]. Cilindrični stup uronjen je vertikalno u bazen do dubine od 27 cm, dakle ne proteže se do dna. Promjer cilindra je 89 mm. Cilindar je postavljen na udaljenosti od 13.7 m od generatora valova. Na kraj domene postavljena je kosina za upijanje valova, tj. sprječavanje refleksije valova nazad u domenu. Iza cilindra do kraja domene ostavljeno je dovoljno prostora da se mjerenja opterećenja mogu izvršiti prije nego eventualno reflektirani valovi stignu do cilindra. Dani su podaci o maksimalnim silama u smjeru uzdužne osi bazena koji su utvrđeni na temelju mjerenja sile tokom deset perioda vala. Ispitani su valovi za frekvencije od 0.7, 0.9, 1.0, 1.1, i 1.43 Hz. Za svaku frekvenciju ispitivanje se provelo za deset nagiba vala, s tim da su odbačeni rezultati prilikom kojih je val dosezao mjerne instrumente, te oni koji nisu uzrokovali mjerljivu silu. Od tih 37 slučajeva nailaznih valova izabrano je 5 za ovu simulaciju.

5.2. CFD proračun opterećenja vertikalnog cilindra uslijed nailaska valova koristeći programski paket OpenFOAM

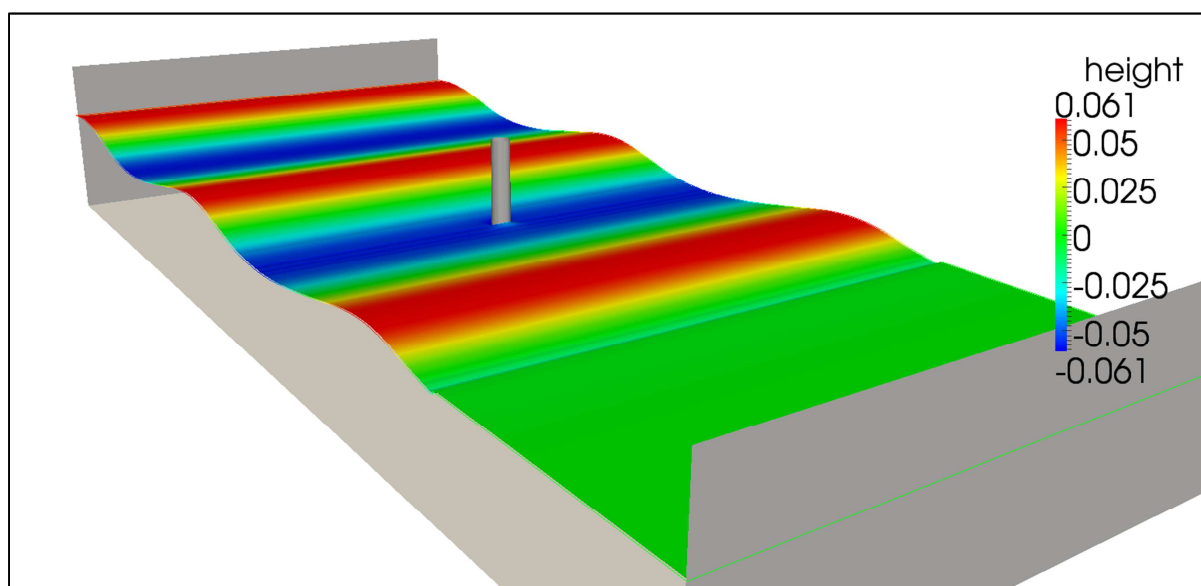
5.2.1. Geometrija domene simulacije i postavke proračuna

Zbog velikog opsega eksperimentalnih rezultata nisu provedeni proračuni za sve slučajeve nailaznih valova. Karakteristike ispitivanih valova dani su u tablici 1. Na temelju frekvencije i valnog nagiba, izračunate su valne visine, duljine i periodi.

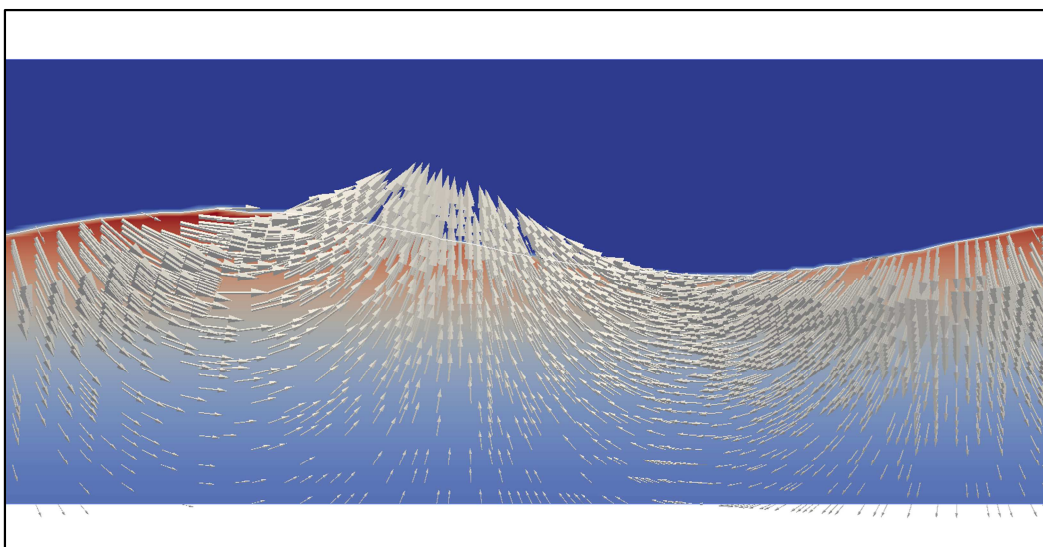
Tablica 1. Karakteristike nailaznih valova.

N	Frekvencija f , Hz	Nagib vala $k * \eta_a$, rad	Valni broj k , rad/m	Valna visina h , m	Valna duljina λ , m	Period T , s
1	0.70	0.06	1.97	0.060	3.19	1.43
2	0.70	0.12	1.97	0.120	3.19	1.43
3	0.90	0.20	3.26	0.123	1.93	1.11
4	1.10	0.12	4.87	0.050	1.30	0.90
5	1.43	0.20	8.83	0.049	0.76	0.70

Zbog uštede vremena proračuna, za simulaciju nije modelirana cijela duljina bazena eksperimentalnog ispitivanja. Tokom eksperimenta je potrebno imati dovoljno dug bazen kako ne bi došlo do utjecaja refleksiranih valova na rezultate. U simulaciji je taj problem riješen izlaznom relaksacijskom zonom (poglavlje 4), zbog čega je opravdano koristiti kraću domenu. Domena je skraćena i sa prednje strane cilindra. Udaljenost od početka domene do simetrale cilindra postavljena je na 1.5 valne duljine, te je jednaka udaljenost ostavljena i iza cilindra. Dakle duljina domene simulacije ovisi o valnoj duljini nailaznog vala. Na Slici 13 prikazana je domena simulacije vala broj 3 u početnom trenutku. U početnom trenutku u cijeloj je domeni nametnut profil elevacije, također radi skraćanja vremena proračuna. Alternativa je postepeno nametanje brzine i profila vala pomoću ulazne relaksacijske zone, što oduzima znatno više vremena proračuna. Na Slici 13 je vidljiva i izlazna relaksacijska zona, gdje je postavljena mirna slobodna površina pomoću koje se sprječava refleksija valova od kraja domene.

**Slika 13. Prikaz simulacije u početnom trenutku za val broj 3.**

Puna dubina bazena također nije simulirana, već je granica domene postavljena na 0.5 m ispod slobodne površine. Na nju je postavljen takozvani „*slip*“ rubni uvjet na brzinu, koji dopušta tangencijalna gibanja fluida, dok su normalna spriječena. Ovakvo smanjivanje domene je opravdano iz razloga što brzina strujanja u harmonijskom valu eksponencijalno pada sa porastom dubine. Na Slici 14 prikazano je polje brzine vala u uzdužnoj ravnini. Vidljivo je da su brzine pri dnu neznatne u odnosu na one u blizini slobodne površine.

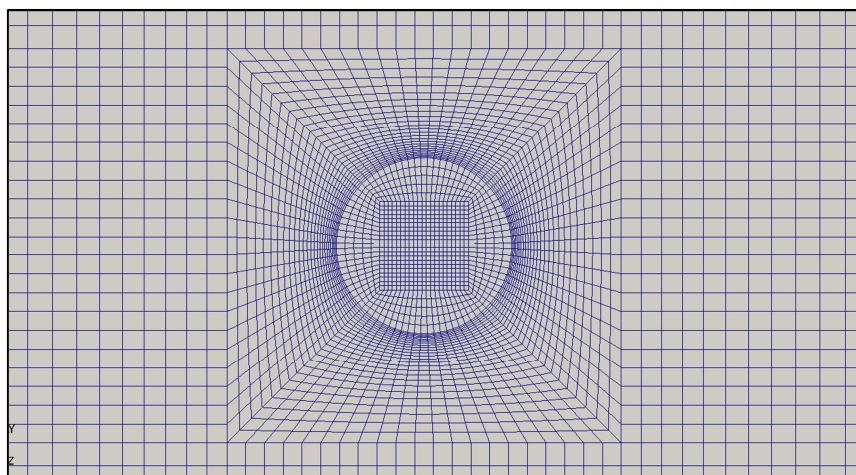


Slika 14. Polje brzine harmonijskog vala.

Duljina ulazne relaksacijske zone je pola valne duljine, dok je duljina izlazne relaksacijske zone jednaka jednoj valnoj duljini. Provodili su se proračuni sa različitim duljinama relaksacijskih zona, međutim kraća relaksacijska zona znači i kraću domenu, obzirom da je potrebno imati dovoljan dio domene gdje rješenje nije nametnuto. Smanjivanjem izlazne relaksacijske zone dolazi do utjecaja refleksije valova, zbog čega njena duljina ne bi smjela biti manja od jedne valne duljine. Na ulaznu i izlaznu granicu domene postavljen je rubni uvjet propisane brzine, dok je za tlak postavljen rubni uvjet nultnog gradijenta. Na ulaznoj granici brzinu propisuje ulazna relaksacijska zona, koja postavlja brzinu iz valne teorije. Na izlaznoj granici ta brzina je jednaka nuli, obzirom da nju propisuje izlazna relaksacijska zona, u kojoj se nameće mirovanje tekućine radi apsorpcije valova. Na bočne stranice domene, kao i na plohe cilindra, postavljen je rubni uvjet zida (podpoglavlje 2.1.1.). Na gornju stranicu domene postavljen je rubni uvjet atmosfere.

Proračun nije proveden sa ravninom simetrije jer se pokazao da to dovodi do većeg odstupanja rezultata u slučajevima sličnim ovome. Broj konačnih volumena u smjeru uzdužne osi nije se mijenjao za različite valove, dakle odnos valne duljine i broja kontrolnih volumena u uzdužnom smjeru nije se mijenjao. Međutim broj kontrolnih volumena mijenjao se u smjeru

vertikalne osi kada je to bilo potrebno (više u 5.2.2.). Na Slici 15 prikazana je mreža konačnih volumena u horizontalnoj ravnini oko cilindra. Mreža koja je korištena za proračune ima 1 728 490 konačnih volumena. Najveći omjer dimenzija ćelija ove mreže je 1:47. Korišteno je postepeno skaliranje veličine ćelija, tako je mreža najfinija oko cilindra, dok je sve grublja prema krajevima domene čime se postiže finija mreža u interesantnom području uz manje povećanje vremena proračuna.

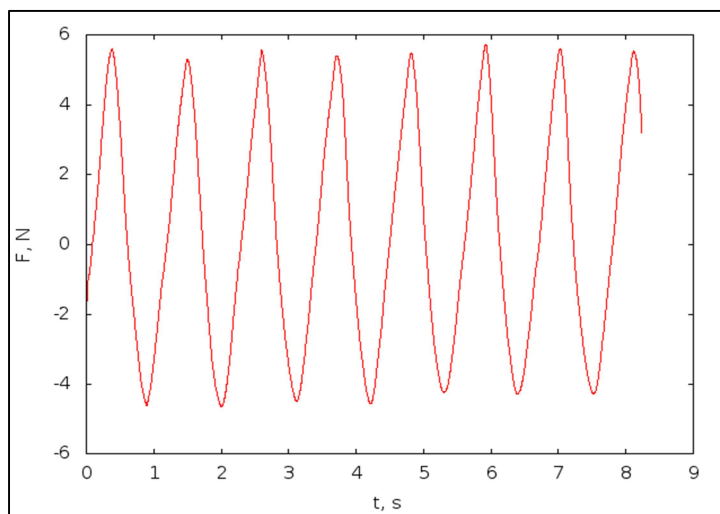


Slika 15. Prikaz mreže konačnih volumena u blizini cilindra.

Kružna kontura na Slici 15 predstavlja granicu cilindra. Kvadrat unutar cilindra je modeliran isključivo zbog boljeg rasporeda kontrolnih volumena, međutim kontrolni volumeni unutar cilindra ne sudjeluju u proračunu.

5.2.2. Rezultati CFD proračuna

Provedene su simulacije za valove navedene u tablici 1. Promatrane su sile u smjeru uzdužne osi te su uspoređivane sa eksperimentalnim rezultatima. Na Slici 16 prikazan je primjer signala sile u smjeru uzdužne osi za val broj 3 iz tablice 1.



Slika 16. Signal sile u smjeru uzdužne osi za val br. 3 (tablica 1).

Za usporedbu sa eksperimentalnim podacima potrebno je pronaći maksimum sile u signalu sile tokom 8-10 perioda vala. Usporedba rezultata maksimuma sile sa eksperimentalnim rezultatima za pojedini val prikazana je u tablici 2, te su navedeni brojevi ćelija u pojedinom eksperimentu. Navedeni su i Courantovi brojevi te Courantovi brojevi korišteni za transport polja funkcije α . Za valove za koje se dobilo veliko odstupanje sile sa izvornom mrežom, ponovili su se proračuni sa promijenjenim brojem ćelija. Brojevi valova odgovaraju tablici 1.

Tablica 2. Usporedba rezultata CFD proračuna sa eksperimentalnim podacima.

Broj vala N	CFD rezultati F_x, N	Eksperimentalni rezultati F_x, N	Relativna pogreška $Err, \%$	Broj ćelija	Courantov broj Co	Courantov broj za α αCo
1	1.778	1.80	1.22	1 728 490	6.0	3.0
2	4.790	5.00	4.20	1 728 490	6.0	3.0
3	5.573	5.70	2.23	1 728 490	2.0	1.5
4	2.390	2.80	14.64	1 728 490	1.5	0.75
4	2.361	2.80	15.68	2 805 810	1.5	0.75
5	2.650	3.08	13.96	1 728 490	2.0	1.5
5	2.854	3.08	7.34	2 629 410	2.0	1.5

Za valove broj 1, 2 i 3 dobivena su prihvatljivo mala odstupanja. Vidljivo je da su se za više frekvencije dobila veća odstupanja sile. Točnost rezultata dakle ovisi o finoći mreže i o frekvenciji vala. Za manje valove, te za valove viših frekvencija, potrebno je koristiti finiju mrežu u smjeru vertikalne osi. Za val 4 i 5 proveden je proračun sa finijom mrežom u vertikalnom smjeru, te su i ti rezultati prikazani u tablici 2. Vidljivo je da je odstupanje smanjeno za val broj 5 korištenjem finije mreže, dok za val broj 4 odstupanje nije znatno promijenjeno. Treba napomenuti da su finije mreže korištene za ponovni proračun sila uslijed valova broj 4 i 5 i dalje relativno grube mreže, ta bi daljnje profinjavanje mreže rezultiralo boljim rezultatima.

6. GENERIRANJE EKSTREMNOG VALA

Ekstremni val (eng. „*Freak wave*“, „*Rogue wave*“) je fenomen koji nije u potpunosti objašnjen. Štoviše, još uvijek nije uspostavljena opće prihvaćena jednoznačna definicija. Prema jednoj od definicija, ekstremni val ima najmanje dva puta veću visinu od značajne valne visine u pripadnom stanju mora [11]. Prema drugim autorima ekstremni val je val čija je visina tri puta veća od značajne valne visine. Radi se pojavi sa izuzetno malom vjerojatnosti pojavljivanja, koja prema [11] iznosi oko 10^{-8} . Fizička pozadina nastajanja ekstremnog vala nije razrješena kao niti utjecaj okoline. Naime, smatra se da osim povoljne interferencije valnih komponenti stanja mora, mora doći do još nekih pojava koje utječu na nastajanje ekstremnog vala. To su utjecaji atmosferskog tlaka, brzine vjetra, batimetrije (konfiguracije dna), morskih struja i drugih pojava. Ono što je poznato je da ekstremni valovi predstavljaju opasnost po pomorske objekte i brodove, te se u posljednje vrijeme sve više pažnje posvećuje mogućnostima numeričkih proračuna opterećenja uslijed takvih pojava.

6.1. Modeliranje ekstremnog vala pomoću spektra valova

U ovom se radu za generiranje ekstremnog vala koristila metoda fokusiranja valova koji su dobiveni kao harmonijske komponente određenog spektra valova. Dakle da bi se proizveo ekstreman val, fazni pomaci pojedinih valnih komponenti podešavaju se tako da na željenom mjestu u prostoru dođe do pozitivne interferencije valnih komponenti. Time su se zanemarili prije spomenuti mogući utjecaji okoline na nastajanje ekstremnog vala. Međutim uzroci nastajanja ekstremnog vala u prirodi nisu predmet ovog rada, već se nastoji prikazati mogućnost generiranja ekstremnog vala za moguću primjenu proračuna opterećenja pomorskih objekata. Amplitude pojedinih valnih komponenti izračunaju se korištenjem empirijske formule spektra valova. Empirijske formule spektra valova su izrazi koji daju funkcije spektralne gustoće vala $S_{\eta\eta}(\omega)$ kao funkciju kružne frekvencije valnih komponenti. Parametri o kojima ovisi funkcija spektralne gustoće su parametri stanja mora. U ovom radu je odabran Bretschneider-ov izraz za spektralnu gustoću energije valova [12]:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \frac{173 \cdot H_{1/3}^2}{T_1^4} \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(\frac{-692}{T_1^4} \cdot \omega^{-4}\right), \quad (22)$$

gdje je $H_{1/3}$ značajna valna visina, dok je T_1 dominantni period vala. Značajna valna visina statistička je mjera kojom se opisuje stanje mora. Predstavlja srednju vrijednost visine trećine

najviših valova [13]. Uspostavljanjem odnosa između značajne valne visine i dominantnog perioda vala dobiva se Pierson-Moskowitz jednoparametarski spektar:

$$T_1 = 3.86 \cdot \sqrt{H_{1/3}}, \quad (23)$$

Pomoću izraza (22) za željenu značajnu valnu visinu dobije se funkcija spektralne gustoće $S_{\eta\eta}(\omega)$ koja je definirana sljedećim izrazom [13]:

$$S_{\eta\eta}(\omega) \Delta\omega = \frac{1}{2} \eta_a^2, \quad (24)$$

gdje je η_a amplituda pojedinog harmonika, dok je $\Delta\omega$ korak kružne frekvencije koji je proizvoljno odabran. Pomoću izraza (24) možemo pomoću odgovarajuće frekvencije i odabranog koraka frekvencije dobiti iznos amplitude valne komponente:

$$\eta_a(\omega) = \sqrt{2S_{\eta\eta}(\omega) \Delta\omega}. \quad (25)$$

Profil vala je određen sumom harmonika čije su amplitude određene gornjim izrazom za pojedine frekvencije. Elevacija slobodne površine u proizvoljnom trenutku i položaju u prostoru dana je izrazom:

$$\eta(x, t) = \sum_{i=1}^n \eta_{ai} \cos(k_i x - \omega_i t + \varepsilon_i) \quad (26)$$

gdje su:

$$k_i = \frac{\omega_i^2}{g}, \text{ valni broj pojedinog harmonika (vrijedi za veliku dubinu [13])}, \quad (27)$$

ω_i , kružna frekvencija pojedinog harmonika,

ε_i , fazni pomak pojedinog harmonika.

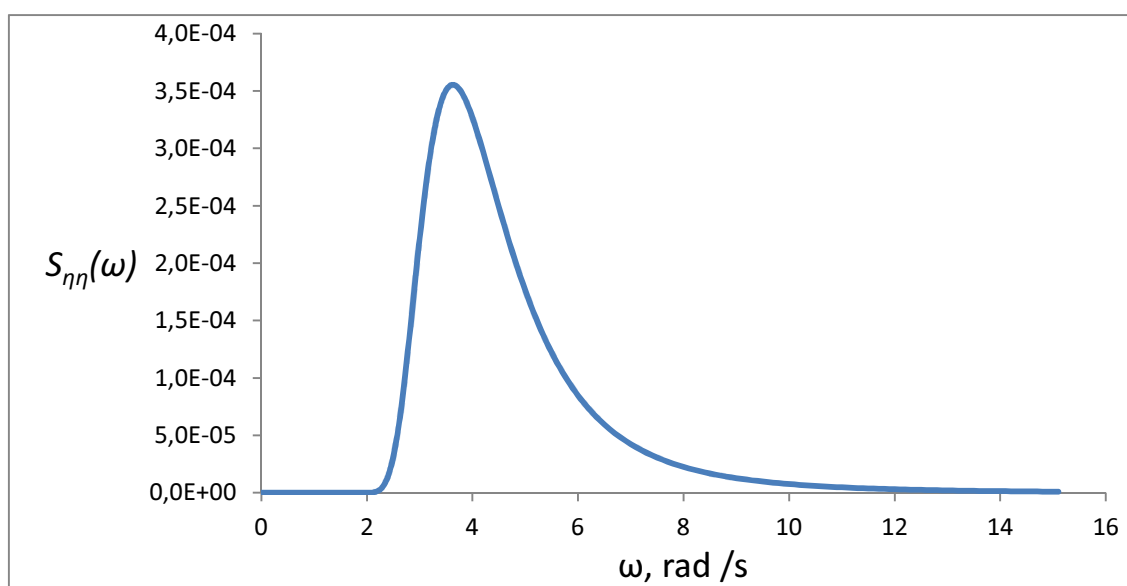
Fazni pomak pojedinih harmonika obično se zadaje kao slučajna veličina čija je razdioba vjerojatnosti jednolika. Na taj način zadržava se stohastički karakter elevacije morske površine [13]. Drugim riječima reproducira se elevacija koja statistički odgovara stanju mora na temelju kojega je određen spektar energije valova. Tako funkcija (26) prestaje biti deterministička funkcija te postaje slučajna funkcija. Međutim za potrebe inicijalizacije ekstremnog vala potrebno je pronaći takve fazne pomake koji će dati ekstremnu vrijednost

amplitude vala na željenom mjestu i u željeno vrijeme. Iz tog razloga fazni pomaci koji se koriste za inicijalizaciju ekstremnog u ovom radu nisu slučajne veličine. Time se odstupa od stohastičke teorije valova pošto tako određena elevacija slobodne površine neće biti slučajan proces. Međutim, ekstremni val modeliran je spektrom gustoće energije valova za zadano stanje mora, čime se dobije elevacija slobodne površine koja jest moguća, iako je njena vjerojatnost pojavljivanja vrlo niska. Upravo ta niska vjerojatnost pojavljivanja onemogućuje simulaciju ekstremnog vala koristeći slučajne fazne pomake, pošto bi takva simulacija trajala veoma dugo. Obzirom da se ovaj rad ne bavi vjerojatnošću pojavljivanja ekstremnih valova, nije se upuštalo u analizu statističke valjanosti ovakve inicijalizacije ekstremnog vala. Cilj poglavlja je ispitati mogućnosti inicijalizacije ekstremnog vala kao opasne pojave po konstrukcije pomorskih objekata i brodova, u svrhu mogućeg proračuna opterećenja uslijed takve pojave.

6.1.1. Izračun faznih pomaka valnih komponent i profila elevacije slobodne površine

Da bi se mogao izračunati spektar valova po jednadžbi (22) potrebno je odabrati značajnu valnu visinu stanja mora. Za simulaciju ekstremnog vala u ovom radu korištena je ista mreža koja je korištena za simulaciju iz poglavlja 5. Iz tog je razloga odabrana značajna valna visina jednaka najvećem valu simuliranom u poglavlju 5 kako bi ekstremni val bio istog reda veličine. Na Slici 17 prikazana je funkcija spektra dobivena izrazom (22) za odabranu valnu visinu:

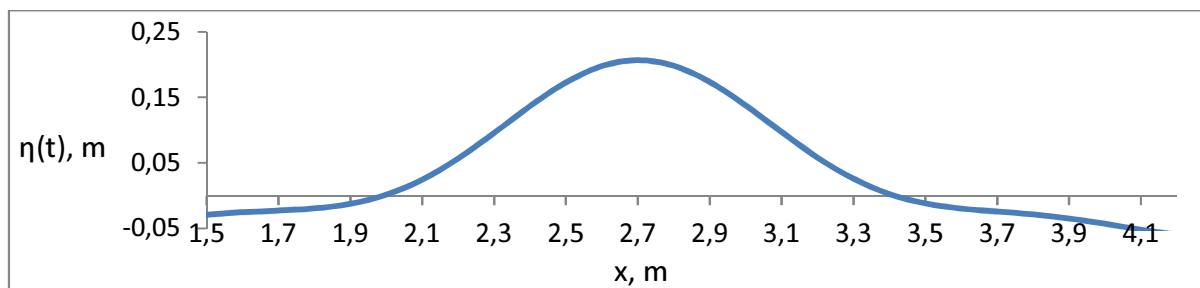
$$H_{1/3} = 0.12 \text{ m}$$



Slika 17. Dijagram funkcije spektralne gustoće valova.

Iz prikazane funkcije spektra potrebno je odrediti amplitude valnih komponenti pomoću izraza (25). Broj valnih komponenti koji će se koristiti za simulaciju odrediti će frekvencijski razmak $\Delta\omega$. Za ovu simulaciju koristit će se 30 valnih komponenta, prema preporuci iz [14]. Interval frekvencija za koji će se računati amplitude određen je najmanjom i najvišom kružnom frekvencijom za koju iznos spektralne gustoće nije jednak ili približno jednak nuli. Na Slici 17 se može vidjeti ta je donja granica oko 2 rad/s, dok je gornja oko 14 rad/s. Dakle taj je interval frekvencija podjeljen na 30 jednakih dijelova te su pomoću jednadžbe (25) određene amplitude valnih komponenti i valni brojevi prema izrazu (27). Nadalje je potrebno odrediti fazne pomake.

Pronalaženje faznih pomaka za trideset valnih komponenti koji će dati maksimalni iznos funkcije elevacije slobodne površine (26) na točno određenom mjestu može se promatrati kao optimizacijski problem. Za točku fokusiranja je određena točka neposredno ispred cilindričnog stupa. Optimizacija je izvršena pomoću programskog paketa Excel, koji je pronašao rješenje za trenutak 2.66s. Profil elevacije slobodne površine u tom trenutku određen izrazom (26) prikazan je na Slici 18:



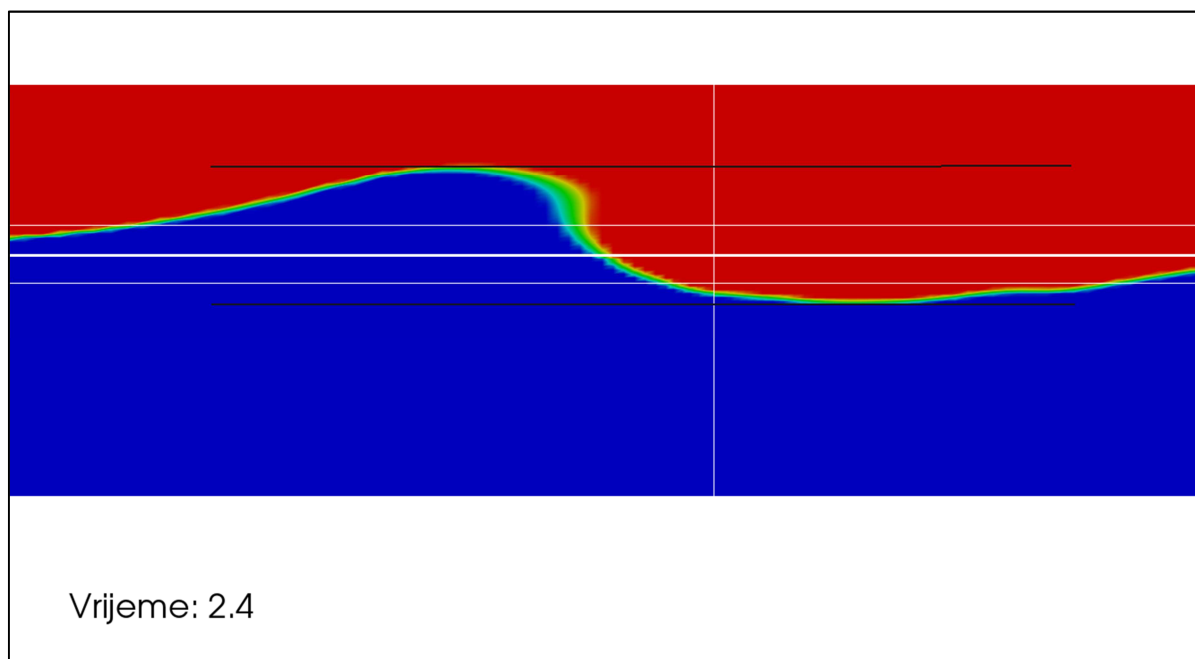
Slika 18. Teoretski izgled ekstremnog vala dobivenog fokusiranjem valova.

Amplituda ekstremnog vala iznosi 0.207m, što je i vidljivo na Slici 18. Valna visina ekstremnog vala iznosi oko 0.255m što je jednako $2.12 H_{1/3}$, odnosno više od dvije značajne valne visine tog stanja mora, što po najšire prihvaćenom kriteriju kvalificira ovaj val kao ekstremni val. Na Slici 18 je vidljivo da je najveća visina postignuta na udaljenosti 2.7m od početka domene, dok je središte cilindričnog stupa postavljeno na 2.8m od početka domene.

6.2. Simulacija ekstremnog vala u programu OpenFOAM

Ekstremni val se također generirao pomoću relaksacijskih zona kao i valovi u simulaciji poglavlja 5, međutim korišten je Pierson-Moskowitz spektar za zadavanje polja brzina i profila slobodne površine u ulaznoj relaksacijskoj zoni. Pierson-Moskowitz spektar je implementiran u program OpenFOAM, te je u program potrebno unijeti značajnu valnu

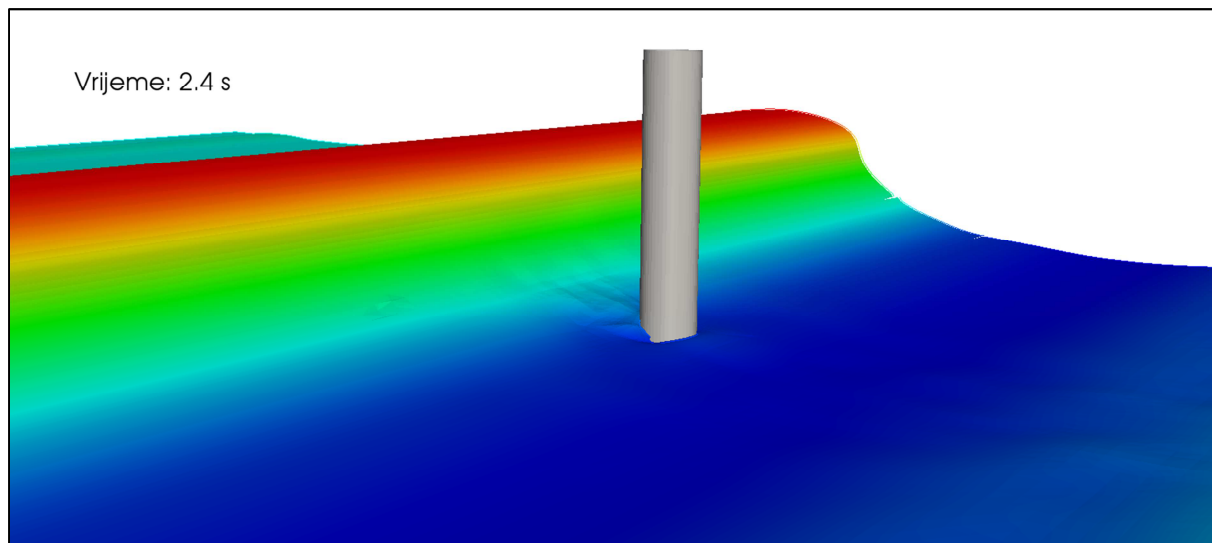
visinu, broj valnih komponenti i fazne pomake valnih komponenti spektra. Kao što je ranije spomenuto, za ovu se simulaciju koristila ista geometrija domene kao u simulacijama u poglavlju 5. Na slijedećoj je slici prikazan profil vala dobiven simulacijom neposredno prije trenutka fokusiranja:



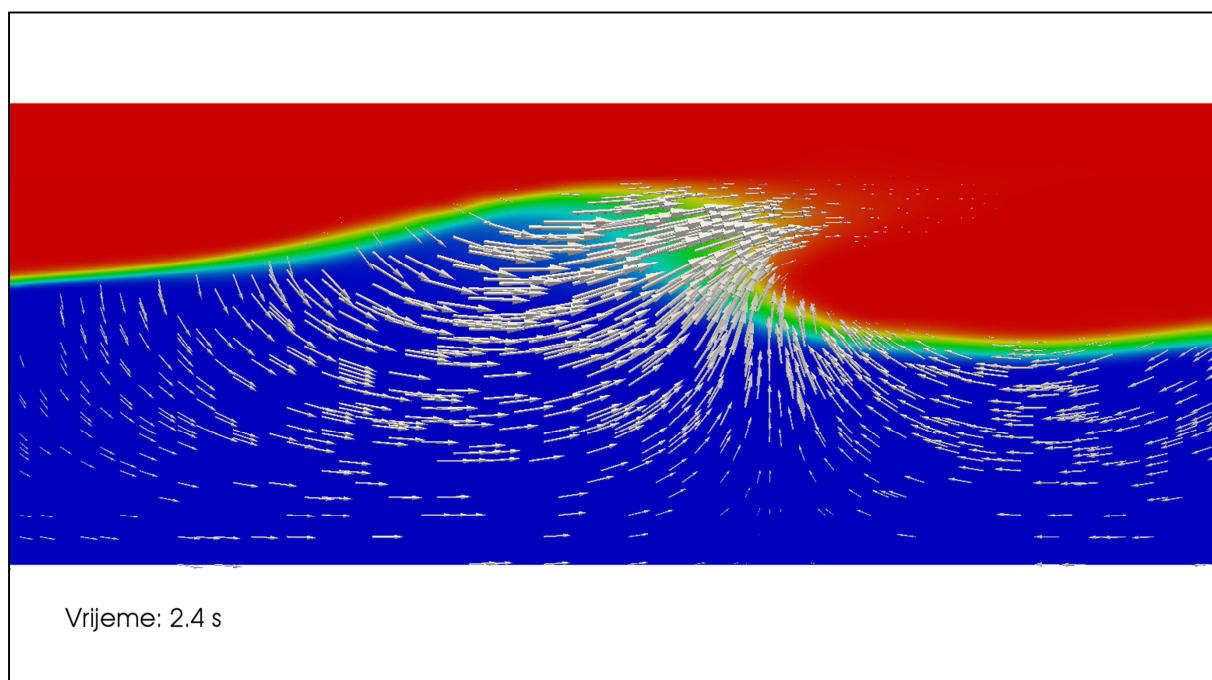
Slika 19. Prikaz profila vala u simulaciji.

Za ovu simulaciju se koristila VOF metoda modeliranja slobodne površine (pogledati podpoglavlje 2.2). Plavom bojom prikazano je područje gdje je vrijednost funkcije α jednaka 1 (voda), dok je crvenom bojom prikazan zrak ($\alpha = 0$). Zelena boja predstavlja prijelazno područje vrijednosti funkcije α . Vidljivo je da je to prijelazno područje izraženo na vrhu vala, što bi se moglo poboljšati uporabom „*Level Set*“ metode modeliranja slobodne površine, međutim ta metoda još nije implementirana za korištenje sa relaksacijskim zonama. Na Slici 19 horizontalna deblja bijela linija označava položaj razine mirne slobodne površine. Tanke bijele horizontalne linije prikazuju pozitivnu i negativnu amplitudu koja odgovara značajnoj valnoj visini. Crne horizontalne linije prikazuju vrh brijega i dno dola ekstremnog vala. Razlika u visini je očita, i odgovara predviđanju proračuna (Slika 18). Bijela vertikalna linija pokazuje položaj središta cilindričnog stupa, val propagira sa lijeva na desno. Na Slici 20 prikazana je simulacija u trenutku koji odgovara Slici 19. Može se vidjeti početak lomljenja vala, što je posljedica nelinearnosti procesa. Lomljenje vala ne može se predvidjeti linearnom superpozicijom valnih komponenti, zbog čega se izgled profila vala razlikuje od onoga prikazanog na Slici 18. Na Slici 20 je vidljivo i strujanje uz cilindar u smjeru suprotnom od

napredovanja vala. Slika 21 prikazuje polje brzina u valu u istom trenutku, u ravнини паралелној са сredišњом уздужном равнином.

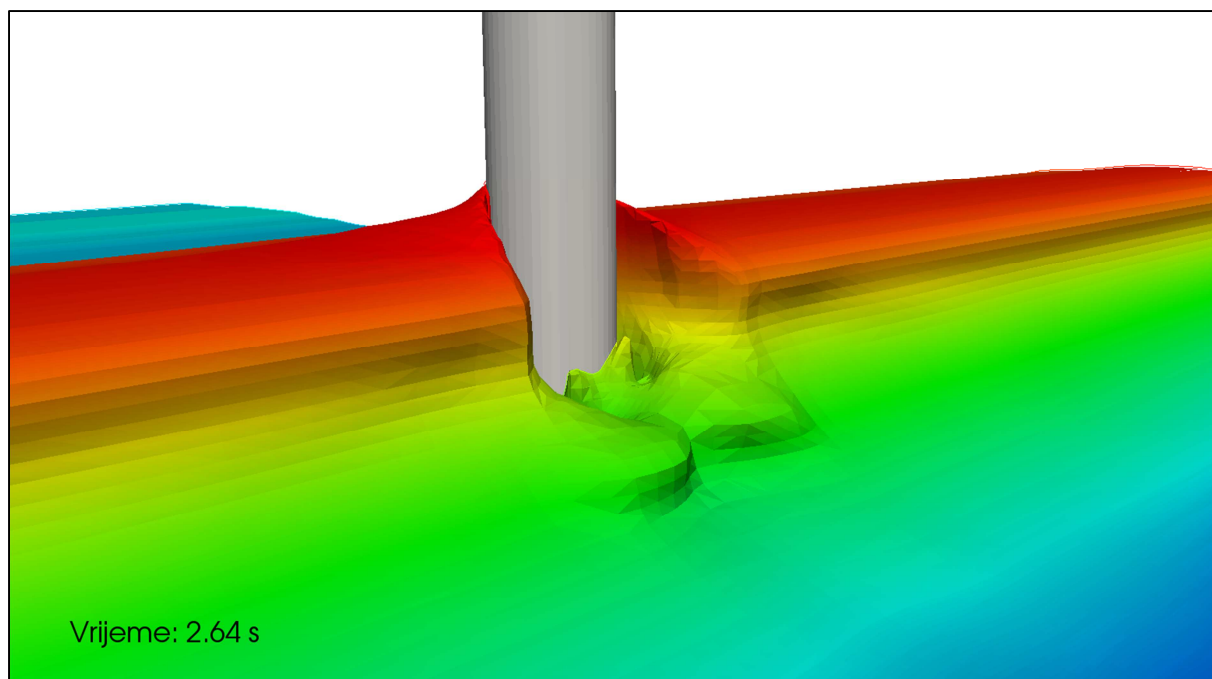


Slika 20. Prikaz simulacije u trenutku prije udara vala u cilindrični stup.



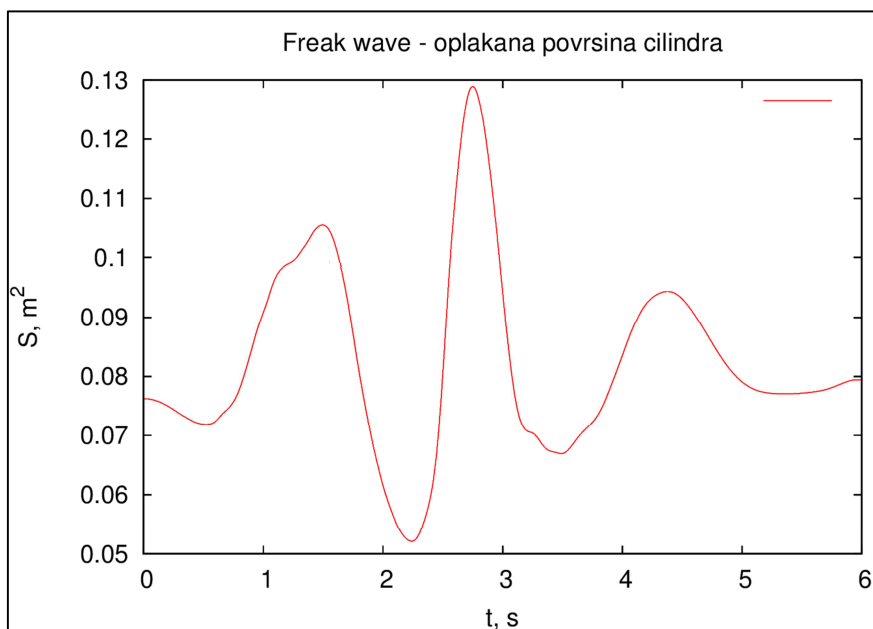
Slika 21. Prikaz polja brzine u ekstremnom valu.

Daljnje napredovanje vala uzrokovalo je sve veću valnu strminu na prednjoj strani vala, Slika 22 prikazuje trenutak simulacije u kojemu je došlo do udara vala u cilindrični stup. Vidljivo je da je u trenutku udara nagib vala bio gotovo vertikalalan. To odgovara čestom opisu ekstremnog vala kao „zida vode“.



Slika 22. Prikaz simulacije u trenutku udara ekstremnog vala u cilindrični stup.

Na Slici 22 vidi se da se radi o vrlo tranzijentnoj pojavi koja nije opisiva linearnim proračunskim teorijama. Slika 23 prikazuje ovisnost oplakane površine cilindra o vremenu. Linearna teorija proračuna valnih opterećenja pretpostavlja konstantnu oplakanu površinu. Iz Slike 23 je očito da bi takva pretpostavka u ovom slučaju dovela do značajnih pogrešaka.



Slika 23. Ovisnost oplakane površine cilindra o vremenu uslijed nailaska ekstremnog vala.

7. ZAKLJUČAK

Kroz rad je prikazana mogućnost primjene CFD alata na moderne probleme u brodogradnji. Provedene su simulacije za tri problema: opterećenje uslijed udara vodenog vala o nepomičnu konstrukciju, opterećenje nepomične konstrukcije uslijed nailaznog harmonijskog vala i inicijalizacija ekstremnog vala.

Rezultati simulacije opterećenja nepomične konstrukcije uslijed udara vodenog vala (poglavlje 3) vrlo se dobro slažu sa eksperimentalnim podacima. Ovo je od posebne važnosti obzirom da druge metode teško dolaze do rješenja ovakvih problema. Ono što CFD proračun u OpenFOAM-u čini posebno primjenjivim za ovaj slučaj je činjenica da se za relativno grubu mrežu dobiju dobri rezultati, pri čemu je proračun trajao svega 7 sati (4 Intel procesora od 3.4GHz, 15.6 GB RAM memorije).

Simulacija opterećenja cilindričnog tijela uslijed nailaska harmonijskih valova (poglavlje 5) pokazala je dobre rezultate za dio ispitivanih valnih karakteristika. Sila za valove viših frekvencija dala je znatnija odstupanja. Rezultati ovise o korištenom Courantovom broju (tablica 2.). Potencijalne linearne metode u ovom području daju vrlo dobre rezultate, zbog čega CFD proračun teško konkurira brzim potencijalnim proračunima za ovakve slučajeve pravilnih valova. Moglo bi se zaključiti da bi u ovom području primjena CFD proračuna bila ograničena na detaljniju analizu opterećenja netipičnih konstrukcija.

Ekstremni val inicijaliziran u CFD programu pokazuje vrlo dobre rezultate. Val je inicijaliziran superpozicijom 30 valnih komponenti. Problemi opterećenja uslijed ekstremnog vala gotovo su nerješivi dosadašnjim metodama. Područje ekstremnih valova je dakle područje gdje CFD proračun ima primjenu, te može povećati sigurnost pomorskih, iako je teorija i praksa generiranja ekstremnih valova u CFD-u još u povoju.

Za neke slučajeve u brodogradnji CFD metode proračuna nisu praktične u usporedbi sa bržim potencijalnim linearnim metodama, zbog današnjih mogućnosti računala. Međutim za neke, jednako važne probleme, CFD metode proračuna su nezamjenjive.

8. LITERATURA

- [1] Degiuli, N., Werner, A.: *Mehanika Fluida IIB - podloge za nastavu*, <http://www.fsb.hr/zbrodo/>, 2009.
- [2] Ubbink, O.: *Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces*, Imperial College of Science, Technology & Medicine, London, 1997.
- [3] Osher, S., Fedkiw, R.: *Level Set Methods and Dynamic Implicit Surfaces*, Springer, New York, 2003.
- [4] Jasak, H.: *Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flows*, Imperial College of Science, Technology & Medicine, London, 1996.
- [5] Hirt, C.W., Nichols, B.D.: Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, *Journal of computational physics*, 1981., 39, 201 – 225.
- [6] Sussman, M., Fatemi, E.: An efficient, interface-preserving level set redistancing algorithm and its application to interfacial incompressible fluid flow, *Siam J. Sci. Comput.*, 1999., 20, 1165-1191.
- [7] Vukčević, V.: Finite volume simulation of two phase flows using a conservative level set method for interface tracking, 11.th World Congress of Computational Mechanics, work in progress, 2014.
- [8] http://cfm.mace.manchester.ac.uk/sph/TestCases/SPH_Test1.html
- [9] Jacobsen, N. G., Fuhrman, D. R., Fredsøe, J.: A Wave Generation Toolbox for the Open-Source CFD library: OpenFoam, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2012, 9, 1073 – 1088.
- [10] Boo S.Y.: Measurements of higher harmonic wave forces on a vertical truncated circular cylinder, *Ocean Engineering*, 2006, 33, 219-233.
- [11] Kharif, C., Pelinovsky, E.: Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon, *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 2003, 22, 603-634.
- [12] Journée, J.M.J., Massie W.W.: *Offshore hydromechanics*, Delft University of Technology, 2001.
- [13] Prpić-Oršić, J., Čorić, V.: *Pomorstvenost plovni objekata*, Zigo, Rijeka, 2006.
- [14] Zhao, X.: Numerical simulation of extreme wave generation using VOF method, *Jurnal of hydrodynamics*, 2010, 22, 466-477.